

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA AMBIENTAL

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERA E INGENIERO AMBIENTALES

TEMA:
ANÁLISIS CLIMÁTICO Y DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DISTRITO
METROPOLITANO DE QUITO

AUTORES:
KAREN ESTEFANÍA SANTILLÁN ICAZA
BRYAN ESTEBAN ZAMORA ROMERO

TUTOR:
MARÍA SHEILA FABIOLA SERRANO VINCENTI

Quito, marzo del 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Karen Estefanía Santillán Icaza con documento de identificación N° 172182366-2 y Bryan Esteban Zamora Romero con documento de identificación N° 172160554-9, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: ANÁLISIS CLIMÁTICO Y DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERA E INGENIERO AMBIENTALES, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

.....
Karen Estefanía Santillán Icaza

172182366-2

.....
Bryan Esteban Zamora Romero

172160554-9

Quito, marzo 2021

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo Experimental, **ANÁLISIS CLIMÁTICO Y DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO** realizado por Karen Estefanía Santillán Icaza y Bryan Esteban Zamora Romero, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, marzo 2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Sheila', written over a horizontal dotted line.

María Sheila Fabiola Serrano Vincenti

171026757-4

DEDICATORIA

El presente trabajo experimental está dedicado a Dios, él quiso para mí un futuro mejor al destino que me esperaba, gracias infinitas por las bendiciones que desde niño no merezco padre mío. A mi Tía Zoila en segundo lugar, el llegar a este punto de mis estudios, ha sido su abrazo de madre, su escucha, su pasión por ayudar, la admiración y el respeto tan grande que le tengo, gracias por no abandonarme cuando más lo necesité. A mis hermanas Dayra y Abi por ser durante mis años en casa, la razón de mi superación diaria y constante, siendo hermano mayor aprendí la responsabilidad de llevar una buena vida. A Mamá Lucinda, Papa Vicente, Mamita Susy y Papa Jacinto, mis ángeles, su predilección me enseñó que la vida tiene su colorido, gracias por los guardaditos, por confiar en mí, por pedir a Dios la protección en mis viajes largos, por la bendición a diario, aunque ya no estén los tres en este mundo, sé que me miran desde lo más alto, gracias por curar mi corazón. A mi Madre Leslie y a mi Padre Sergio por darme la vida. A mi Tío Wilfrido mi jefe durante estos años por darme el respaldo económico para poder concluir mi formación profesional. A Byron y Samia por acogerme en su hogar desde mi primer semestre, enseñarme con cariño y hacerme sentir un miembro más de su hogar. A Magali, Marlon, Javier, Jhamiel, Valerie y Ezequías por ser mi familia a la cual le tengo un cariño muy especial. A Miryan Cristina Peralta Espinosa, la mejor amiga que la vida me dio, una persona incondicional que me enseñó la familia que uno escoge, mi hermana, mi confidente, mi guía. Te quiero beffita.

A Karen por ser una amiga verdadera, un respaldo gigante y un ser humano excelente

A Paúl, Edgar, Edison, Bryan, por los buenos momentos vividos, y por los que vendrán, éxitos en su vida profesional.

Esteban

El presente trabajo de titulación está dedicado primero a Dios, por guiarme en cada uno de mis pasos y permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi vida, el cual anhele por tanto tiempo y que ahora disfruto gracias a sus infinitas bendiciones.

A mi madre, el pilar fundamental de mi hogar, la persona que ha estado constantemente a mi lado para apoyarme en todas y cada una de las etapas de mi vida y que a pesar de los obstáculos ha sabido como sacarme adelante sin rendirse ni un solo segundo.

A mi padre, que me ha motivado constantemente a ser una mejor persona, quien siempre ha creído en mí y me ha brindado su apoyo incondicional en cada uno de mis logros y fracasos. Gracias por valorar mis esfuerzos y estar pendiente de mí en todo momento.

A mi hija, quien con su amor me ha enseñado que la vida tiene sus recompensas y que vale la pena luchar por todo aquello que nos hace ser mejores. Es por ella que el deseo de superación crece día a día, porque es su luz la que alumbra mi camino y me motiva a seguir adelante.

A mi familia y amigos, que siempre han estado ahí para darme el ánimo que he necesitado para cumplir con mis objetivos y alcanzar mis metas.

A mi compañero de tesis, un buen amigo que a pesar de tantos buenos y malos momentos ha logrado contribuir a que este proyecto que hemos construido juntos y que al inicio parecía interminable sea posible.

Karen

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por permitirnos tener el privilegio de cursar aulas llenas de fuertes y buenos momentos, porque pudimos llegar a este punto que al iniciar parecía tan inalcanzable.

A nuestros padres y familiares que estuvieron siempre confiando en que podíamos lograr todo aquello que nos propusiésemos.

A nuestra tutora, Sheila Serrano Vincenti, ya que aún con los momentos adversos atravesados, supo brindarnos la guía necesaria para manejar paquetes informáticos, así como la motivación y los contactos que permitieron terminar este trabajo experimental.

Al Ingeniero Agustín Bolaños técnico de la REMMAQ, quien con su pasión por su trabajo supo explicarnos vía virtual sin escatimar su tiempo y nos llevó a profundizar la investigación.

A la Dra. Karina Pazmiño por su predisposición en la documentación requerida.

Al Ministerio de Defensa del Ecuador y a la Operadora Turística Pailón del Diablo, organizaciones claves en nuestro desarrollo profesional.

Al Ing. Freddy Cuarán, Ing. Diana García, Ing. Renato Sánchez, Ing. Carlos Ulloa, Ing. Arias, Ing. Freddy Suntaxi, Ing. Calzadilla, Ing. Lozano, Ing. César, Ing. Molloacana, Ing. Gutiérrez, Ing. Miguelito, por sus conocimientos compartidos. A la Universidad Politécnica Salesiana, Campus Sur, Sede Quito por ser nuestro segundo hogar durante 6 años, sus instalaciones nos permitieron alcanzar el sueño anhelado de culminar nuestros estudios superiores.

A nuestros amigos los DBO's, una fraternidad con la cual tenemos gratos y graciosos momentos jamás olvidados.

Esteban y Karen

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo General.....	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3. MARCO TEÓRICO	4
3.1 Climatología	4
3.2 Variables Climatológicas.....	5
3.2.1 Precipitación.....	5
3.2.2 Temperatura Atmosférica.....	6
3.2.3 Humedad Relativa	8
3.2.4 Viento	9
3.2.5 Presión Barométrica	10
3.3 Cambio Climático y Variabilidad Climática	11
3.3.1 Cambio Climático	11
3.3.2 Variabilidad Climática	11
3.3.3 Efectos Del Cambio Climático Antrópico	12
3.3.4 Efecto Isla De Calor Urbano	14
3.3.5 Cambio Climático En Ecuador	14
3.3.6 Cambio Climático En Quito.....	16
3.4 Índices Recomendados Por El IPCC	18
3.5 Institutos De Información Meteorológica.....	20
3.5.1 Instituto Nacional De Meteorología E Hidrología (INAMHI).....	20
3.5.2 Red Metropolitana De Monitoreo Atmosférico De Quito (REMMAQ).....	21
3.6 Tipos De Estaciones Meteorológicas	22
3.6.1 Estación Meteorológica Automática	23
3.6.2 Estación Meteorológica Convencional.....	23
3.7 Herramientas De Análisis Estadístico	23
3.7.1 Programa R.....	23
3.7.2 RClimdex	24
4. MATERIALES Y MÉTODOS	26
4.1 Área De Estudio Y Datos	26
4.1.1 Área De Estudio	26
4.1.2 Datos	28

4.1.3 Estaciones Meteorológicas.....	28
4.1.4 Transformación De Formatos	31
4.1.5 Control De Calidad De Los Datos	39
4.1.6 Limpieza De Datos Atípicos	42
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
5.1 Climatología	45
5.1.1 Precipitación	45
5.1.2 Temperatura	53
5.1.3 Temperatura Máximas	56
5.1.4 Temperatura Mínimas	57
5.1.5 Presión.....	63
5.1.6 Humedad Relativa.....	67
5.1.7 Vientos	73
5.2 Resultados Cambio Climático	84
5.2.1 Tablas De Análisis De Cambio Climático Con Rclimindex	84
5.3 Resultados RClindex	88
5.3.1 Temperatura Mínima.....	88
5.3.2 Temperatura máxima.....	98
5.3.3 Precipitación.....	109
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	123
6.1. Conclusiones.....	123
6.2 Recomendaciones	127
7. BIBLIOGRAFÍA	128
8. ANEXOS	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ocurrencia histórica del Fenómeno del Niño.....	12
Tabla 2. Listado de modelos seleccionados para la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático del Ecuador.....	16
Tabla 3. Índices de cambio climático relacionados con anomalías de temperatura recomendados por la ECTCCDI, utilizados en este estudio, la fórmula para el cálculo de cada índice, se presenta en el Anexo 1.	19
Tabla 4. Índices de cambio climático relacionados con anomalías de precipitación recomendados por la ECTCCDI, utilizados en este estudio. la fórmula para el cálculo de cada índice, se presenta en el Anexo 1.	19
Tabla 5. Coordenadas Geográficas de la ciudad de Quito.....	26
Tabla 6. Límites del Distrito Metropolitano de Quito.....	26
Tabla 7. Descripción de las estaciones meteorológicas INAMHI.....	29
Tabla 8. Descripción de las estaciones meteorológicas REMMAQ.....	30
Tabla 9. Estructura de base de datos INAMHI.....	32
Tabla 10. Representación de base de datos para análisis en RClimdex	33
Tabla 11. Porcentaje de Datos faltantes en las distintas variables de la REMMAQ.....	35
Tabla 12. Estructura de base de datos REMMAQ	35
Tabla 13. Representación de datos para análisis en RStudio	36
Tabla 14. Datos atípicos de presión.....	43
Tabla 15. Datos atípicos de temperatura mínima	43
Tabla 16. Resultados RClimdex para la estación Iñaquito.....	85
Tabla 17. Resultados RClimdex para la estación de Ilobamba	86
Tabla 18. Resultados RClimdex para la estación La Tola	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Anomalías de la temperatura media del aire (°C) observadas en la red de estaciones meteorológicas.	6
Figura 2. Anomalías de la temperatura media del aire (°C) observadas en la red de estaciones meteorológicas.	7
Figura 3. Ciclo hidrológico	9
Figura 4. Representación esquemática de las altas y bajas presiones	10
Figura 5. Fotografía tomada de El Comercio plataforma gubernamental.....	18
Figura 6. Representación simplificada del algoritmo con entradas y salidas para la transformación de datos	25
Figura 7. Ubicación de las estaciones meteorológicas del DMQ.....	27
Figura 8. Manual de usuario sobre el manejo del software “Rclimindex” (a, b, c y d)	34
Figura 9. Datos crudos de precipitación, estación El Camal.....	40
Figura 10. Datos crudos de precipitación de las estaciones de a) Carapungo, b) Cotocollao, c) El Camal y d) Tumbaco.	41
Figura 11. Datos crudos de Temperatura mínima de a) Izobamba y b) Iñaquito.....	41
Figura 12. Datos crudos de Velocidad del viento, estación Cotocollao.....	42
Figura 13. Representación de las precipitaciones mediante boxplot horario de 0 a 23 horas en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco	46
Figura 14. Representación de las precipitaciones mediante boxplot intermensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola.....	48
Figura 15. Representación de las precipitaciones mediante histograma intermensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola.....	50

Figura 16. Representación de las precipitaciones mediante boxplot anual de las estaciones de a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Ñaquito, f) Izobamba y g) La Tola	52
Figura 17. Representación de la temperatura mediante boxplot diario de 0 a 23 horas en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco.....	54
Figura 18. Representación mediante histograma de la temperatura máxima intermensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Ñaquito, f) Izobamba y g) La Tola	56
Figura 19. Representación mediante histograma de la temperatura mínima intermensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Ñaquito, f) Izobamba y g) La Tola	57
Figura 20. Representación mediante boxplot de la temperatura máxima anual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Ñaquito, f) Izobamba y g) La Tola.....	60
Figura 21. Promedio Anual de Temperatura Máxima.....	61
Figura 22. Representación mediante boxplot de la temperatura mínima anual en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Ñaquito, f) Izobamba y g) La Tola.....	62
Figura 23. Representación de la presión barométrica mediante boxplot horario de 0 a 23 horas en las estaciones de. A) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco	64
Figura 24. Representación de la presión barométrica mensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco	65
Figura 25. Representación mediante boxplot anual de la presión en las estaciones de: a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Ñaquito, f) Izobamba y g) La Tola	66

Figura 26. Representación de la humedad mediante boxplot horario de 0 a 23 horas en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco.....	68
Figura 27. Representación mediante histograma de la humedad mensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola	70
Figura 28. Representación mediante boxplot de la humedad anual en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco,	72
Figura 29. Representación mediante boxplot horario de la velocidad del viento de 0 a 23 horas en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola	73
Figura 30. Representación mediante histograma de la velocidad del viento intermensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola	75
Figura 31. Representación mediante boxplot anual de las estaciones: a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola.....	75
Figura 32. Representación mediante rosa de los vientos horaria de 0 a 23 horas de las estaciones: Cotocollao y El Camal.....	78
Figura 33. Representación mediante rosa de los vientos horaria de 0 a 23 horas de las estaciones: Tumbaco y Carapungo.....	79
Figura 34. Representación mediante rosa de los vientos mensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones; Cotocollao, El Camal, Carapungo y Tumbaco	80
Figura 35. Representación mediante rosa de los vientos anual de las estaciones. a) Cotocollao y b) El Camal.....	82
Figura 36. Representación mediante rosa de los vientos anual de las estaciones; Carapungo y Tumbaco.....	83

Figura 37. Resultado gráfico de porcentaje de días cuando $TN < 10p$ de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	89
Figura 38. Resultado gráfico de porcentaje de días en los que $TN > 90p$ de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	91
Figura 39. Resultado gráfico de valor mínimo temperatura mínima de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	93
Figura 40. Resultado gráfico de valor máximo de temperatura mínima diaria de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	94
Figura 41. Resultado gráfico de duración de olas de frío de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	
Figura 42. Resultado gráfico de días con heladas de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola	97
Figura 43. Resultado gráfico de porcentaje de días en los que la $TX < 10p$ de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	99
Figura 44. Resultado gráfico de porcentaje de días en los que $TX > 90$ de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	100
Figura 45. Resultado gráfico de valor máximo de temperatura máxima diaria de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	101
Figura 46. Resultado gráfico de valor mínimo de temperatura máxima diaria de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	103
Figura 47. Resultado gráfico de recuento anual de días con al menos 6 días consecutivos cuando $TX > 90$ de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola	104
Figura 48. Resultado gráfico de días de verano cuando la temperatura máxima sobrepasa los $25^{\circ}C$ de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola	106

Figura 49. Resultado gráfico de rango de temperatura diaria de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	107
Figura 50. Resultado gráfico de precipitación máxima en un día de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	110
Figura 51. Resultado gráfico de precipitación máxima en cinco días de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	111
Figura 52. Resultado gráfico de precipitación anual en días húmedos mayores a 1 mm de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola	113
Figura 53. Resultado gráfico de días con lluvia mayor a 10mm de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	114
Figura 54. Resultado gráfico de días con lluvia mayor a 20 mm de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	115
Figura 55. Resultado gráfico de días secos consecutivos de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	116
Figura 56. Resultado gráfico de días lluviosos consecutivos de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	118
Figura 57. Resultado gráfico de días muy húmedos que sobrepasan el percentil 95 de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola	119
Figura 58. Resultado gráfico de días extremadamente lluviosos sobrepasan el percentil 99 de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola	120
Figura 59. Resultado gráfico de precipitación total anual de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola.....	121

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue determinar la climatología del Distrito Metropolitano de Quito y encontrar, a través del uso de los índices recomendados por el IPCC posibles evidencias de cambio climático, sobre estaciones puntuales.

Para lo cual se tomaron los datos de 7 estaciones meteorológicas, de las siguientes variables; precipitación, temperatura, humedad, presión, velocidad y dirección del viento. Cuatro estaciones de la REMMAQ con un total de 872 208 datos, desde el año 2004 hasta mayo del 2020. Así como también, tres pertenecientes al INAMHI con un total de 5 5884 datos, desde el año 1965 hasta el año 2019.

Existen escasos análisis climatológicos específicos que abarquen las variables mencionadas en el DMQ, por lo que la presente investigación busca aportar en el entendimiento del clima en la capital y para la creación de modelos de adaptación que puedan ser aplicados en la ciudad.

Los datos obtenidos fueron transformados a formatos uniformes con scripts en Python y RStudio. Se muestra un análisis climático a nivel interanual, estacional y de ciclo diurno para las variables de temperatura atmosférica, presión barométrica, precipitación, humedad relativa, velocidad y dirección del viento. Asimismo, se realizó un análisis de los índices de cambio climático recomendados por el IPCC, cuyos resultados muestran la diferencia que existe entre las estaciones urbanas y rurales, en los que se evidencia además el efecto isla de calor urbana y la presencia de cambio climático en cuanto a los resultados de valor mensual máximo de temperatura mínima diaria (TN_x) y valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria (TN_n), que muestra un calentamiento en Iñaquito con significancias estadísticas sobre el 90% de certeza para 14 de los 22 índices de cambio climático recomendados por el IPCC. En Izobamba se presentaron 12 de los 22. Sin embargo, en La Tola tan sólo son significativos 2 de los 22 índices, este resultado se debe

en parte a un período frío y seco registrado del 2005 al 2009, después del cual se evidencia un calentamiento inclusive más rápido.

Palabras claves: Climatología, Cambio Climático, IPCC, análisis climático, significancia estadística.

ABSTRACT

The main aim of this research was to determine the climatology of the Metropolitan District of Quito and to find, through the use of the indexes recommended by the IPCC possible evidence of climate change, on specific seasons. For which data were taken from 7 weather stations, from the following variables; precipitation, temperature, humidity, pressure, speed and wind direction. Four REMMAQ stations with a total of 872,208 data, from 2004 to May 2020. As well as three belonging to INAMHI with a total of 5,5884 data, from 1965 to 2019. There are few specific climate analyses covering the variables mentioned in the DMQ, so this research is aimed at being a pillar for the creation of adaptation models that can be applied in the city. The data obtained was transformed into uniform formats with scripts in Python and RStudio. A year-on-year, seasonal and day cycle climate analysis is shown for variables in atmospheric temperature, barometric pressure, precipitation, relative humidity, wind speed and direction. In addition, an analysis of the climate change rates recommended by the IPCC was carried out, the results of which show the difference between urban and rural stations, which also shows the urban heat island effect and the presence of climate change in terms of the results of maximum monthly daily minimum temperature value (TN_x) and minimum monthly daily temperature value (TN_n) , showing warming in Iñaquito with statistical significances of 90% certainty for 14 of the 22 climate change rates recommended by the IPCC. 12 of the 22 were introduced in Izobamba. However, in La Tola only 2 of the 22 indexes are significant, this result is partly due to a cold and dry period recorded from 2005 to 2009, after which even faster warming is evident.

Key words: Climatology, Climate Change, IPCC, climate analysis, statistical significance.

SIGLAS Y ABREVIATURAS

CC	Cambio Climático
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
DMQ	Distrito Metropolitano de Quito
ECTCCDI	Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático
EICU	Efecto Isla de Calor Urbano
GEI	Gases Efecto Invernadero
IAMQ	Análisis y Monitoreo de Quito
INAMNHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
REMMAQ	Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito
OMM	Organización Meteorológica Mundial
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo experimental está enfocado en el análisis estadístico de la climatología y en los posibles efectos de Cambio Climático en el DMQ, tomando en cuenta la evaluación distintas variables mediante software recomendados por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), usando datos de: precipitación, temperaturas atmosféricas máximas y mínimas, vientos, humedad y presión barométrica, tomados de diferentes estaciones meteorológicas distribuidas en la ciudad de Quito, las mismas que pertenecen al INAMHI y a la REMMAQ, las cuales deben tener una representatividad histórica en cuanto a la toma de datos.

Una vez obtenidos los parámetros específicos y una base de datos recopilada por estación, variable y medición, se espera relacionar cada una de sus variaciones a lo largo de los años con eventos climáticos considerados como extremos en la ciudad de Quito, utilizando métodos estadísticos que muestren de manera gráfica diferentes comportamientos de acuerdo a cada una de las variables escogidas y que a su vez estas puedan ser explicadas y demostradas.

“La evaluación exhaustiva de los aspectos físicos del cambio climático se centra en aquellos elementos pertinentes para comprender el pasado, documentar el presente y proyectar el cambio climático futuro” Stocker et al. (2013).

A causa de esta posible afectación, es necesario realizar un adecuado análisis de este tipo de eventos, y para ello se requieren datos a resolución temporal diaria. La recopilación de esta información a escala global es una tarea bastante compleja, en parte a la limitada disponibilidad de series de datos confiables y de una extensión suficiente para la evaluación de los eventos extremos.

Se hace necesario empezar los análisis climáticos en territorio ya que, según, Muñoz et al. (2010). “se ha podido constatar que el Ecuador, debido a su ubicación

geográfica, junto con su variada topografía, es un país que se encuentra altamente vulnerable a los posibles impactos del Cambio Climático”.

Teniendo en cuenta la problemática actual y la falta de información actualizada acerca de los fenómenos meteorológicos en el Ecuador, el siguiente trabajo experimental tiene como finalidad poder ser una posible base para posteriores investigaciones, ya que desde hace varios años la meteorología ha sido subestimada y dejada de lado por la falta de recursos económicos, humanos y/o conocimiento científico adecuado, además de no contar con suficiente información a lo largo del país que puedan ser el sustento que impulse a seguir ahondando en el tema. Así como también poder demostrar que existen factores asociados a distintos tipos de fenómenos que experimentamos diariamente y a los cuales se los puede considerar además como efectos del Cambio Climático.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

- ❖ Determinar la climatología del Distrito Metropolitano de Quito y encontrar, a través del uso de los índices recomendados por el IPCC posibles evidencias de cambio climático, sobre estaciones puntuales.

2.2 Objetivos Específicos

- ❖ Verificar los datos históricos adquiridos mediante un control de calidad de las estaciones meteorológicas susceptibles de estudio.
- ❖ Caracterizar el comportamiento climático de Quito en forma: diaria, estacional y anual.
- ❖ Calcular los índices de variabilidad climática recomendados por el IPCC, y determinar si existe o no evidencia de Cambio Climático sobre Quito.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Climatología

La climatología se describe como una ciencia que se encarga del estudio del clima y sus variaciones a lo largo de un determinado tiempo (INAMHI, 2013). Ayuda a describir las diferentes variaciones de: viento, presión barométrica, precipitación, temperaturas, radiación, etc. Esto facilita la elaboración de registros climáticos para documentar el comportamiento y crear investigación histórica.

El clima es inherentemente cambiante, y estas variaciones existen en muchos espacios y escalas temporales. Es común que parte de esta variabilidad, se vaya dando de temporada a temporada. Pero gran parte de ella, incluidos los cambios sobre años, décadas, siglos y milenios, es poco conocida y en gran medida impredecible. Por lo tanto, las decisiones en sectores o actividades sensibles a las condiciones climáticas generalmente se toman bajo incertidumbre o riesgo, a veces empleando probabilidad estadística.

En cuanto a la variabilidad climática, esta responde a las fluctuaciones del clima que a lo largo del transcurso de los años y desde épocas remotas se han presentado en diversas escalas de tiempo y a su vez de espacio. El entendimiento de la variabilidad climática en un amplio rango de escalas espaciales y temporales es uno de los temas más relevantes en ciencias geofísicas. (Poveda, 2004)

La incertidumbre en la variabilidad climática se ve cada vez más acentuada por el hecho de que se intensifican las actividades humanas, desde la industrialización y más aún en el presente, están causando un cambio en el clima de la Tierra.

3.2 Variables Climatológicas

3.2.1 *Precipitación*

“Se conoce como precipitación al agua en cualquiera de los tres estados físicos en que alcanza la superficie terrestre, proveniente de la atmósfera” (Cando, 2010). Además, es considerado como un factor crucial para el progreso de la vida en el planeta tierra, pues tiene una estrecha relación con la humedad, viento, temperatura y evaporación.

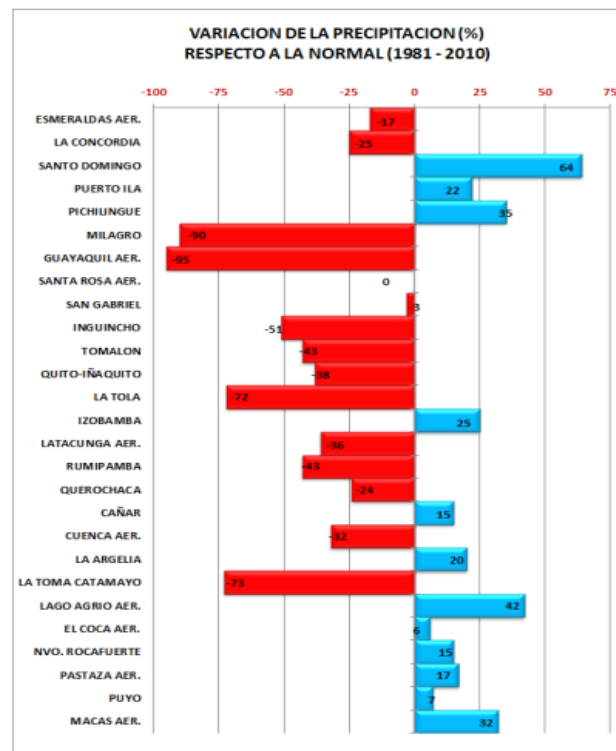
Como variable meteorológica se la considera de mayor importancia, ya que su medición puede determinar si existen o no eventos climatológicos extremos en el lugar de estudio, además forma parte del ciclo hidrológico, el cual se genera a partir de la saturación de gotas de agua presentes en las nubes y que por acción de la gravedad estas tienden a descender de acuerdo a su tamaño en forma de lluvia, llovizna, granizo o nieve.

Según el (INAMHI, 2020), para mayo del presente año en la región interandina, los volúmenes de agua producto de las precipitaciones reportados desde la red de estaciones meteorológicas, dan cuenta de que esta variable ha disminuido respecto de sus valores promedios en un 77% de los casos. Como se puede observar en la Figura 1, la variabilidad determinada es negativa y predomina en la región, mientras las positivas son escasas y se presentan aisladas entre sí.

Se sugiere entonces que “la cantidad máxima de lluvia que puede precipitar la atmósfera depende exponencialmente de la cantidad de vapor de agua troposférico en las condiciones geográficas específicas” Serrano et al. (2020).

Figura 1.

Anomalías de precipitación del aire (°C) observadas en la red de estaciones meteorológicas.



Nota: El grafico representa las estaciones meteorológicas ubicadas en el DMQ y sus anomalías de precipitación. Tomado de (INAMHI, 2020)

En la ciudad de Quito se observan dos estaciones que son lluviosas: la primera, desde febrero a mayo, por la entrada de masas de aire tropical continental y de octubre a noviembre por el ingreso de masas de aire tropical marítimo. Igualmente, dos estaciones secas, de junio a septiembre y de diciembre a enero. (Velasategui, 2012)

3.2.2 Temperatura Atmosférica

“Se llama temperatura atmosférica a uno de los elementos constitutivos del clima que se refiere al grado de calor específico del aire en lugares y momentos determinados, así como la evolución temporal y espacial del mismo en distintas zonas climáticas” (Jiménez y Cifuentes, 2018).

Al ser considerada como la cantidad de calor que puede estar presente en una determinada masa de aire, es necesario tomar en consideración la variabilidad que esta

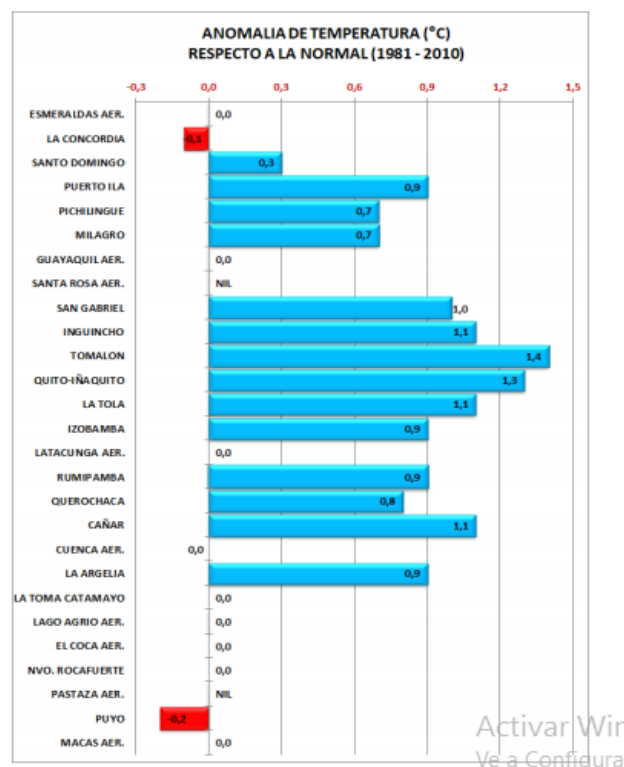
puede presentar con el paso del tiempo. Para lo cual se necesita el análisis de datos diarios, mensuales e incluso anuales, en los cuales se pueda verificar su distribución tanto espacial como temporal que pueden caracterizar el clima de una ciudad o región.

“Formalmente, la temperatura es una magnitud relacionada con la rapidez del movimiento de las partículas que constituyen la materia. Cuanta mayor agitación presenten éstas, mayor será la temperatura” Portela et al. (2004).

Según el (INAMHI, 2020), en la Figura 2 se reportan 14 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de la región, observándose en todas ellas un incremento en relación a sus valores promedios, resultado de lo cual se determina una anomalía absoluta producto de una distribución espacial homogénea, de estas anomalías se aprecia un 50% de casos cuyos valores superan a 1,0°C.

Figura 2.

Anomalías de la temperatura media del aire (°C) observadas en la red de estaciones meteorológicas.



Nota: El grafico muestra las estaciones meteorológicas en el DMQ y sus anomalías de temperatura media. Tomado de (INAMHI, 2020)

3.2.3 Humedad Relativa

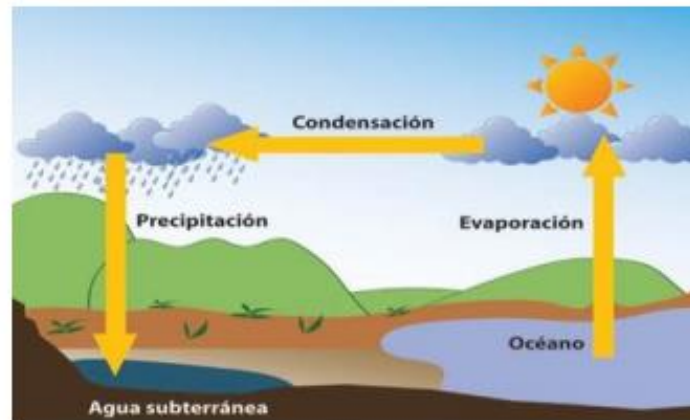
“Se entiende por humedad a la cantidad de vapor de agua presente en una masa o volumen de aire que va ligada al valor de temperatura existente de una manera directamente proporcional” (Troncoso y Barros, 2010).

Al ser un factor importante que caracteriza el clima del Ecuador, se toma en consideración a la humedad relativa, que según (Green y Perry, 2008) es “figurada en porcentaje, la cual representa la saturación y la cantidad de vapor de agua que existe en un determinado lugar”, de tal manera que se pueda realizar o establecer una comparación entre distintas variables, estaciones y mediciones tanto horarias, diarias, mensuales o anuales. Sin embargo, esta variable no tiende a ser constante, pues va a depender de varios factores como son la precipitación, es decir la cantidad de lluvia que se haya dado en un determinado lapso de tiempo.

De esta forma, la humedad relativa indica lo cerca que está una masa de aire de alcanzar la saturación. Al llegar al 100%, se indica que esa masa de aire ya no puede contener más vapor de agua en su seno, y a partir de ese momento, cualquier cantidad extra de vapor se convertirá en agua líquida y precipitará según las condiciones ambientales (Portela et al., 2004), cerrando el ciclo hidrológico como se muestra en la Figura 3

Figura 3.

Ciclo hidrológico



Nota: Representación de los procesos del ciclo hidrológico. Tomado de (Jiménez y Cifuentes, 2018)

3.2.4 Viento

Se lo define como el movimiento horizontal del aire, en el cual se considera el desplazamiento que este posee desde una zona con alta presión hacia otra con baja presión. Este a su vez está determinado como un vector, en el cual se considera dos variables de gran importancia como lo son su magnitud y por lo tanto su dirección.

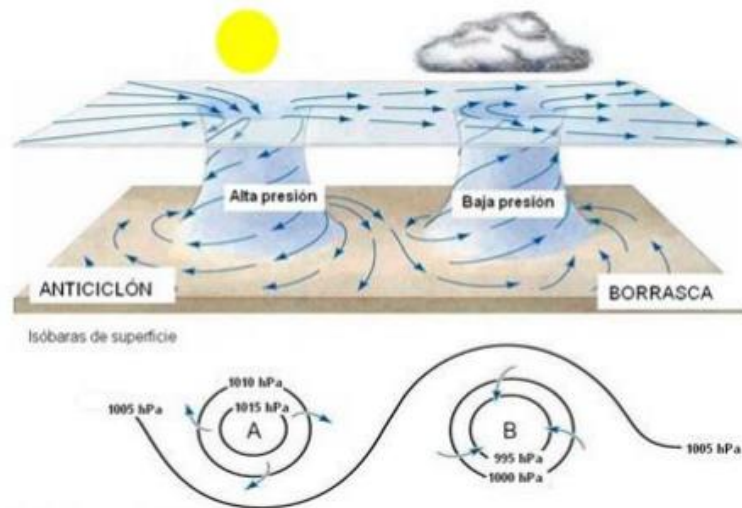
Según afirman Troncoso y Barros (2010) “El valor escalar del viento tiene como unidad de medida (m/s) o (km/h), en tanto que la dirección se registra con la rosa de los vientos medida desde el norte con dirección a las manecillas del reloj”, entonces se dice que el viento se produce por diferentes causas, entre las cuales se menciona la diferencia de temperatura y de presión que pueden existir entre dos puntos.

En el caso de que exista una diferencia térmica con respecto al origen del viento, ocurre que una masa de aire adquiere una temperatura superior a la de su entorno, el volumen aumenta y disminuye su densidad. Como se puede observar en la Figura 4, ya que, por efecto de la flotación, la masa de aire caliente asciende, y por lo tanto su lugar es ocupado por otras masas de aire, que al ser desplazadas llegan a ocasionar el viento.

“Cuando la presión del aire es distinta en dos zonas, tiende a moverse desde la zona de alta presión a la de baja presión. Los meteorólogos dirían que se ha producido un gradiente o diferencia de presión entre ambos extremos” (Portela et al., 2004).

Figura 4.

Representación esquemática de las altas y bajas presiones



Nota: el grafico muestra las variaciones de gradientes de presión. Tomado de (Jiménez y Cifuentes, 2018)

3.2.5 Presión Barométrica

Esta variable está determinada por su implicación en las condiciones climáticas, aunque es casi imperceptible, tiene una estrecha relación con las demás variables climatológicas del Ecuador y el mundo en general, ya que gracias a su estudio se puede aplicar en la descripción e interpretación de distintas condiciones meteorológicas.

La presión barométrica está referida como una columna de aire imaginaria, en la cual se mide su peso en un determinado punto y al ejercer una presión este refleja un valor que depende de varias variables, principalmente de la altitud.

Cuanto más arriba de la atmósfera nos localicemos, la cantidad de aire por encima de nosotros será menor, lo que hará que también sea menor la presión que éste ejerza sobre un cuerpo ubicado allí. La temperatura, la situación geográfica, la humedad y las condiciones meteorológicas son sus principales condicionantes. Según Portela et al.,

(2004) Precisamente la relación que existe entre la presión barométrica y el tiempo en un lugar hace de ésta una variable fundamental en la información meteorológica.

3.3 Cambio Climático y Variabilidad Climática

3.3.1 *Cambio Climático*

El cambio climático fue adoptado por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) como, “un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (CMNUCC, 1992).

En la actualidad se describe como: “Alteración del clima debido al aumento de las concentraciones de gases efecto invernadero (GEI) provocado por actividades humanas por el uso de combustibles fósiles, descomposición de residuos urbanos o ganaderos y cambios en el uso de la tierra” (IPCC, Cambio climático, 2007).

3.3.2 *Variabilidad Climática*

La variabilidad climática se caracteriza por la representación de variaciones y fenómenos que se dan dentro de la atmósfera terrestre, estas son cuantificables en el tiempo y espacio, los valores de estas medidas de propensión están fuera de la tendencia central.

“Consiste en aquellos cambios sobre el clima que dependen de condiciones atmosféricas extremas que exceden en mucho a los promedios estándares” (Serrano et al., 2012).

3.3.2.1 Fenómeno Del Niño.

“Durante el periodo de sequía provocado por el fenómeno de El Niño, se evidenciaron problemas de disponibilidad de agua, incendios forestales y heladas” (Arteaga y Burbano, 2017).

Los eventos calificados como niños denominados como muy fuertes o mega niños que han sido históricos, serían los siguientes:

Tabla 1.

Cronología histórica del Fenómeno del Niño

Fenómeno del Niño	F. niño de 1578
	F. niño de 1728
	F. niño de 1790 - 1793
	F. niño de 1828
	F. niño de 1876 - 1878
	F. niño de 1891
	F. niño de 1925 - 1926
	F. niño de 1982 - 1983
	F. niño de 1997 - 1998
	F. niño de 2014 – 2016

Nota: En la tabla se muestra las fechas correspondientes a eventos del fenómeno del Niño desde 1578 hasta el 2017. Elaborado por: Santillán K., Zamora E., 2020. Adaptado de (Arteaga y Burbano, 2017).

3.3.3 Efectos Del Cambio Climático Antrópico

Se puede decir que el capitalismo es el modelo económico que llevó al mundo a acelerar los factores del cambio climático. El uso del carbón y petróleo sumado a la extracción de minerales hacen inequívocamente necesario el uso de las energías

renovables. Las sociedades que se desarrollaron antes de la industrialización tenían un impacto bastante moderado y equilibrado con el ambiente, utilizando fuentes renovables de energía.

Esta reflexión sobre el cambio climático se encuentra en diversos análisis y recomendaciones que han sido muy minuciosas y que relacionan la emisión de gases efecto invernadero como el CO₂, con el incremento de la temperatura en la biósfera del planeta pero que, al plantear posibles alternativas, estas parecieran redundar en estrategias que apuntan a la perpetuación de un modelo industrial que ha dado origen al problema ecológico en cuestión (IPCC, Climate Change, 2012).

Los efectos del cambio climático antrópico como: el aumento del nivel del mar a causa del derretimiento de los glaciares, las inundaciones que se dan por el aumento de las lluvias extremas y en contraparte las sequías en otros sectores debido a la ausencia de precipitaciones por largos periodos.

Así, se ha ido dando a la pérdida de biodiversidad en cada parte del planeta e incluso una afectación directa a los seres humanos. “Distintos autores han vinculado los procesos de extinción y declinación de micromamíferos en América del Sur en tiempos históricos con el impacto de actividades de origen antrópico” (Teta et al., 2005).

Existe además pérdida de bosques en el Ecuador debido a la tala indiscriminada, en el país, ya que anualmente se pierden debido a la deforestación aproximadamente 47.497 hectáreas netas de bosque. Existe también un aumento de la población y franja agrícola, a su vez, también se producen por los cambios extremos del clima especialmente en variaciones de precipitación y temperatura que afectan directamente a los bosques de manera proporcional en su estructura, así como también en su funcionamiento, por ejemplo, con escasez de agua, y menor cantidad de horas de luz, lo cual implica la pérdida

de productividad del bosque (menos producción de madera, alimentos, oxígeno, etc.) (Mogrovejo, 2017).

3.3.4 Efecto Isla De Calor Urbano

Las Islas de Calor Urbano ICU se definen como el incremento térmico del centro urbano respecto a la zona periférica o rural en una misma ciudad. Estos son causados de manera antrópica por el impacto ambiental que generan las zonas urbanas especialmente de materiales como el asfalto y concreto que no se tienen espacios de permeabilidad o escasas áreas verdes, que permitan la pérdida de calor acumulado. (Perico, 2013)

3.3.5 Cambio Climático En Ecuador

El cambio climático es una realidad que ha venido demostrando la vulnerabilidad que tiene el Ecuador para enfrentarse a los mínimos cambios producidos por actividades industriales irresponsables, la dependencia del petróleo y por lo tanto la generación de gases efecto invernadero, que provocan un incremento progresivo de temperatura y eventos extremos de precipitaciones, provocando la desaparición tanto de especies de flora como de fauna por cada grado centígrado que aumenta. Es por esta razón que existe la necesidad de considerar estudios que demuestran estos cambios y las medidas que son necesarias para poder enfrentarlos.

En el Ecuador, en el año 1993 se forma el Comité Nacional Sobre el Clima enfocándose en cuatro objetivos a largo plazo que sentarán las bases para aportar soluciones, así, se designa como presidente del Comité al aquel entonces Ministerio del Ambiente (Venegas, 2020).

El INAMHI ha llevado registros históricos desde 1960 y gracias a ello se logra evidenciar mediante estos datos que Ecuador muestra una clara tendencia al cambio

climático, tanto en sierra, costa y región oriental. En la Costa cada año se marca un aumento de precipitaciones las cuales marcan rastros en desbordamiento de ríos e inundaciones.

En las estaciones del Oriente, el valor de cambio de la temperatura media es positivo en las tres estaciones que se monitorean en esta región, con datos que oscilan entre 0,8°C, en El Puyo, y 1,1°C en Sangay. En promedio, el valor de cambio para la temperatura media en las estaciones monitoreadas alcanza a 0.9°C (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2017).

Desde el 2008, el Ecuador ha adoptado aparentemente una posición de total responsabilidad ambiental, en el artículo número 72 de la Constitución del Ecuador se establece que: “La naturaleza tiene derecho a la restauración. Esta restauración será independiente de la obligación que tienen el Estado y las personas naturales o jurídicas de indemnizar a los individuos y colectivos que dependan de los sistemas naturales afectados” (Constitución del Ecuador, 2008).

El Gobierno de Moreno, ratificó el acuerdo de París en el año 2017 y, posteriormente en 2019 presentó sus avances a nivel nacional a la Convención de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC).

En la Tabla 2 se muestran modelos que se usaron para proyectar el cambio climático en el Ecuador, en el marco de la Tercera Comunicación de Cambio Climático, se escogieron 4 de los 17 modelos de circulación global aptos para la zona de estudio. En cuanto a menos dispersión y mejor reproducción de la climatología estacional. Los resultados presentados se lograron luego de un “ensamble” de los 4 modelos descritos.

Tabla 2.

Listado de modelos seleccionados para la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático del Ecuador

Modelo	Institución	Resolución (°)
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence	1.875x1.8653
GISS-E2-R	NASA-GISS – NASA Goddard Institute for Space Studies	2.5x2
IPSL-CM5A-MR	IPSL - Institut Pierre-Simon Laplace	2.5x2.5352
MIROC-ESM	MIROC – Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo) National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine Earth Science and Technology	2.8125x2.7906

Nota: En la tabla se indica los modelos más comunes utilizados para realizar proyecciones de Cambio Climático. Elaborado por: Santillán K., Zamora E., 2020. Tomado de: (Armenta y Villa, 2016)

Según los modelos en cuanto a las proyecciones climáticas, la temperatura media muestra un aumento de al menos 0,6°C en el periodo 2011-2040 y 1°C en 2041-2070 y 2071- 2100 bajo el escenario “optimista”. En el escenario “pesimista”, habría incrementos de 0,8°C en 2011-2040, 1,7°C en 2041-2070 y 2,8°C para 2071- 2100. Las regiones donde habría un mayor incremento de la temperatura media son la Amazonía, la Costa y Galápagos, con aumentos superiores a 1,5°C desde mitad de siglo, y en esta última región, con incrementos superiores a 2°C. En caso de las lluvias, se encontró un incremento de eventos extremos sobre el percentil 90 para la Sierra y parte de la Amazonía del Ecuador (Armenta y Villa, 2016).

3.3.6 Cambio Climático En Quito

La ubicación de Quito permite que los fenómenos físicos sean más evidentes y palpables, ya que la ciudad está situada en la Cordillera Occidental, se encuentra

también sitiada por el Guagua Pichincha y por el Atacazo al oeste, y se asienta sobre una llanura lacustre que ocupa el eje de la depresión a una cota promedio de 2800 msnm, y que corresponde a una planicie relacionada con una falla geológica longitudinal de 45 km. (Villacis, 2017).

Las lluvias extremas y los cambios bruscos en la temperatura que se suscitan en la ciudad de Quito, son indicios de alteraciones en el medio. “En la capital ecuatoriana, el clima se ve influenciado por lo que sucede en la Amazonía, es por este motivo que las condiciones climáticas varían en pocos kilómetros” (Sandoval, 2018). Las precipitaciones están directamente relacionadas con la Amazonía ecuatoriana, ya que las nubes ingresan por el callejón interandino gracias a los vientos alisios y se forman estratonimbos y cumulonimbos, que junto a otros factores dan paso a la caída de fuertes lluvias en Quito. Sin embargo, existe una fuerte componente de lluvias convectivas generadas por la dinámica local de la capital, y que son exacerbadas por la presencia de los equinoccios del 21 de marzo y del 22 de septiembre, y que marcan el inicio de la temporada lluviosa (Serrano et al., 2012).

En Quito se registró el 15 de mayo del 2017 un evento extremo (definiéndose así, todo evento de lluvia sobre el percentil 99), como se puede observar en la Figura 5, la Plataforma Financiera, una de las construcciones más emblemáticas de la capital, ubicada cerca de la estación de Iñaquito soportó severas inundaciones. En el norte de la ciudad, las intensas lluvias cubrieron aceras y calzadas, dejando atrapados bajo el agua a los automóviles y motocicletas.

“Las fuertes lluvias volvieron a generar acumulaciones de agua en diferentes zonas del sector de Iñaquito, en el norte del Distrito Metropolitano. Pasadas las 17:30 de este jueves 18 de mayo del 2017, el sistema de colectores y alcantarillado de esa parte del

norte volvió a colapsar” (García, 2017).

Figura 5.

Fotografía tomada de El Comercio plataforma gubernamental.



Nota: En la imagen se muestra la inundación en la plataforma gubernamental ocurrida en el 2017. Tomado de: Diario El Comercio.

3.4 Índices Recomendados Por El IPCC

Para el análisis de cambio climático es necesario identificar la relación que existe entre uno o varios indicadores, los cuales representan la variabilidad climática que puede existir al momento de relacionar y comparar variables meteorológicas. Para lo cual en el presente estudio es necesario tomar en consideración los índices climáticos que han sido propuestos por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) del IPCC.

Y es por este motivo que se ha relacionado dichos índices con posibles efectos de cambio climático, los mismos que se muestran en los cuadros a continuación.

Tabla 3.

Índices de cambio climático relacionados con anomalías de temperatura recomendados por la ECTCCDI, utilizados en este estudio, la fórmula para el cálculo de cada índice, se presenta en el Anexo 1.

Índice	Unidad	Nombre del indicador	Cambios esperados bajo por incremento de efecto invernadero (según IPCC,1995)
FD0	Días	Días con heladas	
SU25	Días	Días de verano	
TN10p	%	Noches frías	Los GEI forzan al incremento de la temperatura, provocando que las noches cálidas aumenten. Es una medida directa del número de noches cálidas. Este indicador podría reflejar efectos potencialmente dañinos por la ausencia del enfriamiento nocturno, principal contribuyente del estrés térmico.
TN90p	%	Noches cálidas	
TNn	° C	Temperatura nocturna mínima	
TNx	° C	Temperatura nocturna máxima	
TX10p	%	Días fríos	
TX90p	%	Días calurosos	
TXx	° C	Temperatura máxima durante el día	
TXn	° C	Temperatura mínima durante del día	
WSDI	Días	Duración de periodos cálidos	Los GEI provocan un incremento de la temperatura generando un aumento de evaporación, favoreciendo potencialmente a las sequías.
CSDI	Días	Duración de los periodos fríos	
CDD	Días	Días secos consecutivos	
DTR	° C	Rango diurno de temperatura	Se espera la disminución del DTR como consecuencia directa del aumento del calentamiento nocturno (aumento de temperaturas mínimas). Por otro lado, la disminución en DTR puede deberse a la reducción de la insolación diurna a través del engrosamiento de la cobertura nubosa gris (que generaría disminución de las temperaturas máximas). Para llegar a conclusiones es necesario revisar los valores de temperaturas máximas y mínimas.

Nota. Cambios esperados por el incremento de efecto invernadero. Elaborado por: Santillán K., Zamora E. Adaptado de (Serrano et al., 2012).

Tabla 4.

Índices de cambio climático relacionados con anomalías de precipitación recomendados por la ECTCCDI, utilizados en este estudio. la fórmula para el cálculo de cada índice, se presenta en el Anexo 1.

Índice	Unidad	Nombre del indicador	Cambios esperados bajo por incremento de efecto invernadero (según IPCC,1995)
RX1day	mm	Precipitación	Los GEI generan un incremento del ciclo hidrológico, ya que favorecen la nucleación del vapor de agua en lluvia. Asimismo, el incremento de temperatura permite que la atmósfera contenga más vapor de agua disponible, y por lo tanto se espera un incremento de precipitaciones intensas y/o extremas.
		máxima en 1 día	
Rx5day	mm	Precipitación	
		máxima en 5 días	
SDII	mm/día	Índice simple	
		de intensidad diaria	
R10	Días	Días con lluvia	
		mayor a 10mm	
R20	Días	Días con lluvia	
		mayor a 20mm	
R95p	mm	Días muy lluviosos	
R99p	mm	Días extremadamente lluviosos	
PRCPTOT	mm	Precipitación total anual	
CWD	Días	Días lluviosos consecutivos	Los GEI forzan un incremento de la temperatura generando incremento de evaporación, favoreciendo potencialmente a las sequías.

Nota: Cambios esperados por el incremento de efecto invernadero. Elaborado por: Santillán K., Zamora E. Adaptado de (Serrano et al., 2012).

3.5 Institutos De Información Meteorológica

3.5.1 Instituto Nacional De Meteorología E Hidrología (INAMHI)

Las estaciones meteorológicas son los lugares donde se realizan las mediciones de uno o varios parámetros meteorológicos.

El INAMHI fue creado el 4 de agosto de 1961 y por designación legal rector, coordinador y normalizador de la política hidrometeorológica nacional. Su normativa constitutiva le faculta para el establecimiento, operación y mantenimiento de la Red de Estaciones Hidrometeorológicas, razón por la cual es una institución que genera información básica y suministra servicios y productos hidrometeorológicos necesarios para el desarrollo del país (Valladares y Verdezoto, 2014, pp 21).

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) es la institución encargada de operar y mantener la infraestructura nacional de estaciones meteorológicas e hidrológicas: recopilar, estudiar, procesar, publicar, y difundir la información Hidrometeorológica en el Ecuador, todo de acuerdo a normas internacionales establecidas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), monitorea algunos parámetros meteorológicos; entre los más importantes se encuentran: temperatura, humedad, precipitación, heliofanía, radiación, presión, dirección y velocidad del viento (INAMHI, 2020).

3.5.2 Red Metropolitana De Monitoreo Atmosférico De Quito (REMMAQ)

La REMMAQ fue creada el 13 de octubre de 1994 como una red de provisión de bienes y servicios en pro del medio ambiente aprobada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Tiene como finalidad producir datos confiables sobre la concentración de contaminantes atmosféricos en el territorio del Distrito Metropolitano de Quito que sirvan como insumo para la planificación, formulación, ejecución y evaluación de políticas y acciones orientadas al mejoramiento de la calidad del aire y difundir esta información en condiciones comprensibles para el público en general (REMMAQ|, 2020).

Esta red se encarga del monitoreo climatológico urbano, ya que sus estaciones se encuentran instaladas dentro de la ciudad, con un área de cobertura de entre 10 y 20 km y debido al poco tiempo de estudio con variables climáticas, su histórico de datos no posee más de 20 años. Sin embargo, es de gran utilidad, ya que es capaz de proporcionar datos históricos horarios, lo cual facilita el proceso de análisis en cuanto a la climatología de la ciudad.

Según Bolaños, Agustín (2020), técnico de la REMMAQ, es un subconjunto de la unidad de Investigación, Análisis y Monitoreo de Quito cuyas siglas son IAMQ y a su vez es su nombre oficial en la actualidad. Dicho departamento para la comprensión dentro de la Secretaría del Ambiente y del público en general es conocido como la Red de Monitoreo de Calidad de Aire.

3.6 Tipos De Estaciones Meteorológicas

Para que la información brindada por la estación meteorológica sea adecuada, esta debe ser altamente representativa con su base de datos, así como también la confiabilidad de que los equipos que forman parte del mismo estén correctamente calibrados, y en caso de existir personal para la lectura de los mismos, estos estén debidamente capacitados.

En el caso de la ciudad de Quito para que los datos sean confiables la estación debe ubicarse preferentemente en sitios ligeramente rurales, debido a la variación que causa el efecto isla de calor. Para que la estación meteorológica registre adecuadamente la temperatura el lugar debe estar alejado de árboles, edificios, paredes, cultivos excesivos y otros obstáculos. Es útil, sólo para un radio de 3 a 12 km alrededor de la estación (República, 2008).

La Organización Mundial Meteorológica (OMM) ha establecido horas fijas en las cuales las estaciones meteorológicas climáticas deben realizar las observaciones. Estas son: 12:00, 18:00 y 24:00 UTC (tiempo universal coordinado) y se caracterizan por ser obligatorias para de esta forma mantener la consistencia (Gattinoni et al., 2011), y la calidad de los datos que se incorporan a las bases históricas

Es por esta razón que se espera exista una buena calidad de datos tomados de manera continua y sincronizada para que puedan ser utilizados en todo tipo de estudio o investigación climatológica.

3.6.1 Estación Meteorológica Automática

Las estaciones meteorológicas automáticas son aquellas que poseen un grupo de ciertos instrumentos encargados de medir automáticamente variables atmosféricas, por lo tanto, su característica principal está definida por el almacenamiento y transmisión de datos de manera continua (IDEAM, 2001).

Estas estaciones pueden ser instaladas en aquellos lugares en los cuales el acceso es limitado, permite obtener datos en intervalos pequeños de tiempo y además son indispensables para reducir los errores cometidos por el observador.

3.6.2 Estación Meteorológica Convencional

Una estación meteorológica convencional es aquella que se ubica en un parque o terreno libre de obstáculos, de un área abierta aproximada de 7m x10 m. Debe contar con personal capacitado, el cual se encarga de realizar las lecturas y registro de datos de forma horaria. Este tipo de estación debe contar con instrumentos meteorológicos tales como: pluviómetro, pluviógrafo, visibilómetro, anemómetro, heliógrafo, veleta, tanque de evaporación, termómetros de profundidad y una caseta o refugio con rendijas que debe servir como protección directa de lluvia y radiación solar. A este refugio se lo pinta generalmente de color blanco y es el encargado de almacenar el psicómetro, termohigrógrafo y los termómetros de máxima y mínima temperatura (IDEAM, 2018).

3.7 Herramientas De Análisis Estadístico

3.7.1 Programa R

Herramienta útil en la interpretación de datos mediante un lenguaje especializado de programación en R, a su vez es un software que posee código abierto y de libre descarga que permite realizar el análisis estadístico mediante gráficas ilustrativas con el

fin hacer comparaciones y emitir resultados favorables en cuanto al desarrollo de diversos estudios (Ferrero y López, 2018).

3.7.1.1 Scripts Para R.

Para el análisis de climatología se usaron Scripts específicos en RStudio, los mismos que fueron elaborados por el MSc. Rodrigo Tufiño, los cuales facilitaron el análisis de cada una de las variables para las estaciones del INAMHI y de la REMMAQ.

3.7.2 *RClimdex*

RClimdex es un programa computarizado de Microsoft Excel que se ejecuta en los sistemas operativos tales como Microsoft Windows y Unix / Linux, que permite obtener resultados estadísticos y gráficos, basados en índices de cambio climático con variables tales como: Precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.

Para que el programa informático sea de utilidad, se necesita rangos históricos con un número considerable de data. Borbor, Serrano et al. (2016) afirman lo siguiente:

“Se puede calcular los índices de cambio climático recomendados por el Grupo de Expertos de Índices y Detección de Cambio Climático (ETCCDI) del IPCC, los cuales requieren datos de temperatura y precipitación diarios con un rango superior a 30 años” (p,34)

3.7.2.1 Script De Python Para RCLimdex.

Mediante el algoritmo utilizado en Python se pudieron analizar las variables meteorológicas proporcionadas específicamente por el INAMHI como mecanismo de entrada, y como salida se obtuvo el formato necesario para RCLimdex.

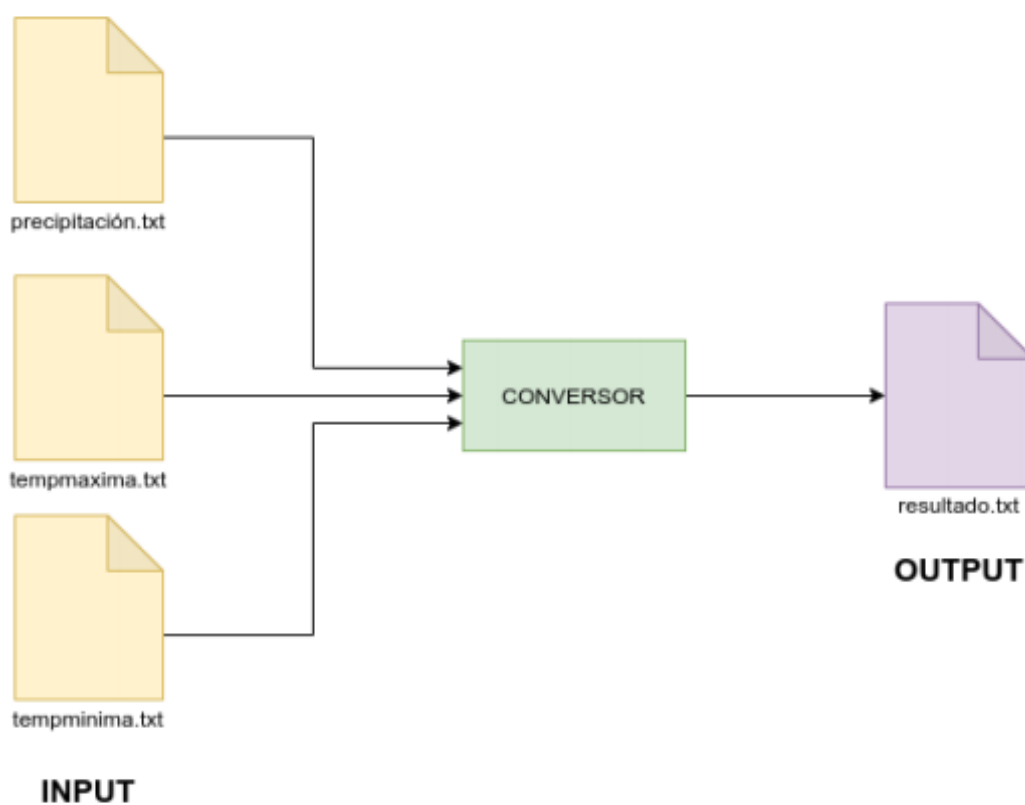
Este algoritmo inicialmente fue utilizado para el análisis de tres de las siete variables de estudio (temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación);

mientras que, en la actualidad puede ser empleado para el procesamiento de más estaciones y por lo tanto más variables (Guamán, 2020).

En la Figura 6 se puede visualizar la representación del algoritmo con sus entradas y salidas. Las mismas fueron elaboradas por el MSc. Rodrigo Tufiño con el fin de facilitar la conversión de datos para el análisis de variables meteorológicas.

Figura 6.

Representación simplificada del algoritmo con entradas y salidas para la transformación de datos



Nota: La imagen representa el algoritmo utilizado para el mapeo de datos meteorológicos. Elaborado por: Tufiño, R. (2020)

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Área De Estudio Y Datos

4.1.1 Área De Estudio

El Distrito Metropolitano de Quito se encuentra ubicado en la provincia de Pichincha, región Sierra, con una altura aproximada de 2850 msnm. Se la considera como cabecera cantonal, debido a sus 2.104,991 hab.

Además, la ciudad de Quito cuenta con un clima templado debido a sus periodos prolongados de lluvia en los meses de marzo y abril con hasta 123 mm de lluvia en promedio, así como también períodos secos en julio y agosto, en el que las precipitaciones no suelen superar los 20 mm. Su temperatura puede estar en un promedio de 25° C, sin embargo, es una ciudad en la que la combinación de lluvias, bajas temperaturas y sol radiante no resultan ser extrañas.

Tabla 5.

Coordenadas Geográficas de la ciudad de Quito

Coordenadas Geográficas		
Latitud	Longitud	Superficie (Km ²)
-0.2298500	-78.5249500	12 000

Nota: En la tabla se muestra las coordenadas del DMQ. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

Tabla 6.

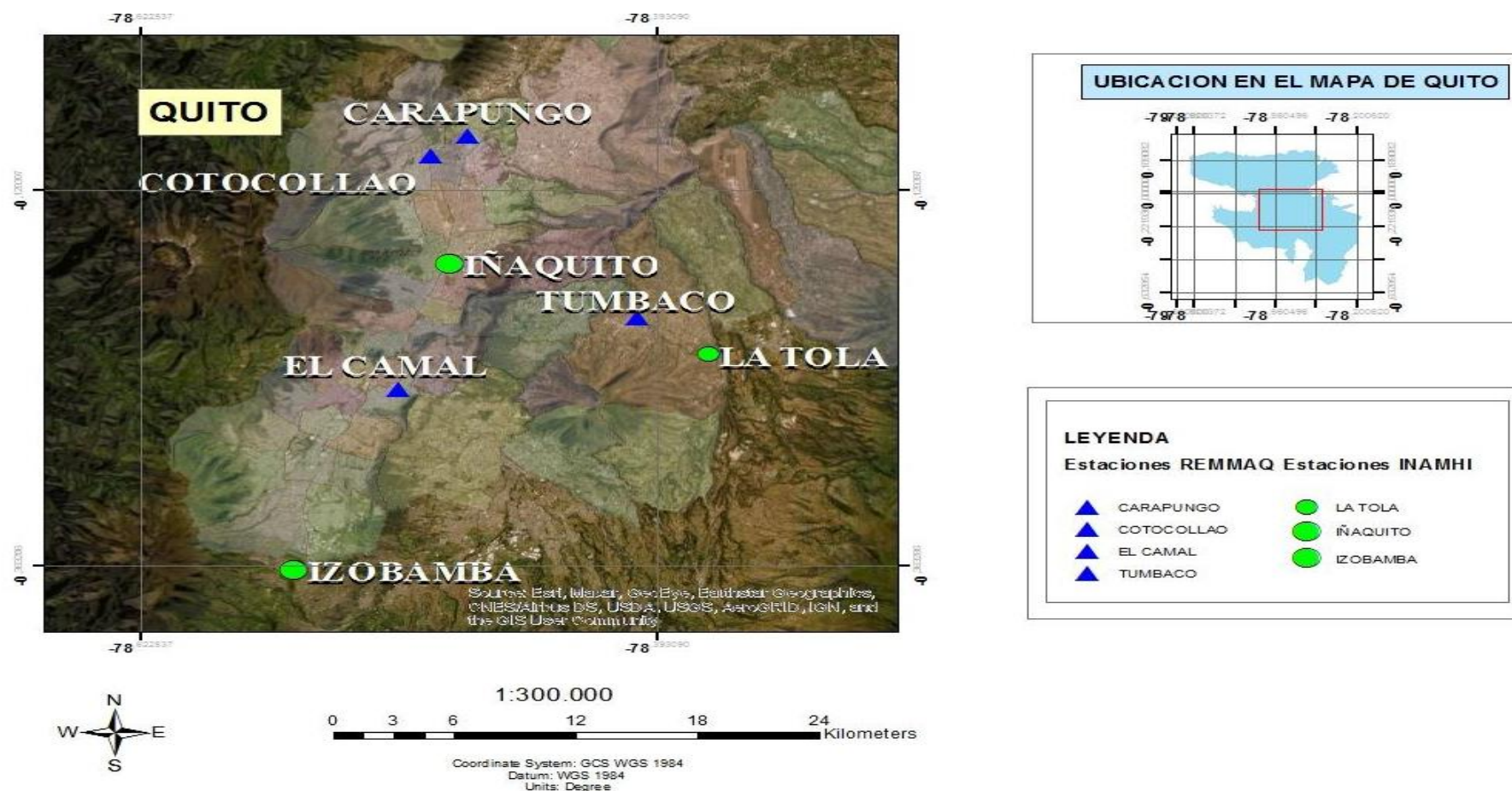
Límites presentes en el Distrito Metropolitano de Quito

Límites	
Norte	Provincia de Imbabura
Sur	Cantones Rumiñahui y Mejía
Este	Cantones Pedro Moncayo, Cayambe y Provincia de Napo
Oeste	Cantones Pedro Vicente Maldonado, Los Banco y Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas

Nota: En la tabla se representa los límites que rodean al DMQ. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

Figura 7.

Ubicación de las estaciones meteorológicas del DMQ.



Nota: la figura muestra el área de influencia en el que se visualizan las estaciones meteorológicas tomadas para el presente estudios. Elaborado por: Los autores

4.1.2 Datos

Para el análisis del presente estudio se recopilaron datos de dos instituciones distribuidas en el DMQ, tales como el INAMHI y la REMMAQ, las mismas que se pueden observar en la Figura 7.

4.1.2.1 INAMHI.

Del INAMHI se pudieron recolectar datos diarios de tres estaciones meteorológicas consideradas las más importantes en el DMQ, tales como Izobamba, Iñaquito y La Tola, con variables de temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y humedad relativa con un periodo de tiempo de aproximadamente 40 años.

4.1.2.2 REMMAQ.

De la REMMAQ se obtuvo datos horarios de las estaciones de Carapungo, Cotocollao, El Camal y Tumbaco, con variables de temperatura media, precipitación, humedad relativa, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento con un histórico mayor a 10 años

4.1.3 Estaciones Meteorológicas

Las estaciones meteorológicas susceptibles de estudios fueron tomadas en consideración debido a su ubicación estratégica dentro del DMQ, también por que contienen la mayor cantidad de datos disponibles en su base histórica y las variables idóneas para ser analizadas en la presente investigación.

4.1.3.1 Estaciones Meteorológicas INAMHI.

En la Tabla 7 se muestra la descripción de datos que se obtuvo de cada una de las estaciones meteorológicas pertenecientes al INAMHI de acuerdo a su histórico de datos:

- Iñaquito: 1975 - 2019
- La Tola: 1980 - 2019
- Izobamba: 1965 - 2019

Tabla 7.

Descripción de las estaciones meteorológicas INAMHI

IÑAQUITO		IZOBAMBA	
Código	M0024	Código	M0003
Latitud	-0.178300	Latitud	-0.365833
Longitud	-78.487700	Longitud	-78.555000
Altura (m)	2789.00	Altura (m)	3058.00
Variables	Precipitación	Variables	Precipitación
	Temperatura máxima		Temperatura máxima
	Temperatura mínima		Temperatura mínima
	Humedad Relativa		Humedad Relativa
Resolución	Diaria	Resolución	Diaria
Histórico de datos (años)	44	Histórico de datos (años)	54
Datos vacíos (%)	5,3	Datos vacíos (%)	1,2

LA TOLA	
Código	M0002
Latitud	-0.231800
Longitud	-78.370400
Altura (m)	2480.00
Variables	Precipitación
	Temperatura máxima
	Temperatura mínima
	Humedad Relativa
Resolución	Diaria
Histórico de datos (años)	39
Datos vacíos (%)	1,6

*Nota: En la tabla se observa las estaciones meteorológicas del INAMHI con sus respectivas variables.
Elaborado por: Santillán K., Zamora E.*

4.1.3.2 Estaciones meteorológicas REMMAQ

En la Tabla 8 se muestra la descripción de datos que se obtuvo de cada una de las estaciones meteorológicas pertenecientes a la REMMAQ de acuerdo a su histórico de datos:

- Carapungo: 2004 - 2020
- El Camal: 2004 - 2020
- Cotocollao: 2004 - 2020
- Tumbaco: 2004 - 2020

A pesar de que las estaciones de Belisario, Centro, Guamaní, Los Chillos y San Antonio, son parte de la red de la REMMAQ, no fueron tomadas en consideración, ya que estas estaciones tienen menos del 70% de datos y al ser comparadas con el resto de estaciones como se puede observar en la Tabla 11, fueron descartadas para la presente investigación.

Tabla 8.

Descripción de las estaciones meteorológicas REMMAQ

CARAPUNGO		COTOCOLLAO	
Código	M5036	Código	M5035
Latitud	-0.205833	Latitud	-0.104444
Longitud	-78.400000	Longitud	-78.491667
Altura (m)	2660.00	Altura (m)	2807.00
Variables	Precipitación	Variables	Precipitación
	Temperatura media		Temperatura media
	Humedad Relativa		Humedad Relativa
	Presión		Presión
	Dirección del viento		Dirección del viento
	Velocidad del viento		Velocidad del viento
Resolución	Horaria	Resolución	Horaria
Histórico de datos (años)	16	Histórico de datos (años)	16
Datos vacíos (%)	3,0	Datos vacíos (%)	5,8

EL CAMAL		TUMBACO	
Código	M5038	Código	M5040
Latitud	-0.250000	Latitud	-0.205833
Longitud	-78.505833	Longitud	-78.400000
Altura (m)	2858.00	Altura (m)	2331.00
Variables	Precipitación	Variables	Precipitación
	Temperatura media		Temperatura media
	Humedad Relativa		Humedad Relativa
	Presión		Presión
	Dirección del viento		Dirección del viento
	Velocidad del viento		Velocidad del viento
Resolución	Horaria	Resolución	Horaria
Histórico de datos (años)	16	Histórico de datos (años)	16
Datos vacíos (%)	14,5	Datos vacíos (%)	1,9

*Nota: En la tabla se observa las estaciones meteorológicas de la REMMAQ con sus respectivas variables.
Elaborado por: Santillán K., Zamora E.*

4.1.4 Transformación De Formatos

La transformación de formatos fue de vital importancia, puesto que era un recurso necesario para poder proceder al análisis de datos de cada una de las variables de estudio y así lograr obtener resultados acordes a la investigación realizada.

4.1.4.1 Transformación De Formato De Datos Meteorológicos Del INAMHI.

Para poder transformar la base histórica de datos obtenida fue necesario un pre procesamiento de los mismos, de tal manera que estos puedan ser compatibles con el software RClimdex.

Razón por la cual fue necesario la utilización de un lenguaje de programación en PHYTON a cargo del MSc. Rodrigo Tufiño, miembro del Grupo de Investigación

Infraestructura de Datos Espaciales, Inteligencia Artificial, Geoportales y Computación Aplicada (IDEIAGEOCA) de la Universidad Politécnica Salesiana.

El algoritmo completo se encuentra en el repositorio de GitHub del Rodrigo

Tufiño (<https://github.com/rtufino/Conversor-Datos-Meteorologicos>).

4.1.4.1.1 Formato Inicial INAMHI.

Los datos meteorológicos obtenidos por el INAMHI se encuentran en un formato de documento de texto (*.txt). La información proporcionada cuenta con 33 columnas, en las cuales las primeras dos corresponden al año y al día de la toma de datos, mientras que las 31 columnas restantes representan los días de cada mes, como se puede visualizar en la Tabla 9. Existen además celdas vacías, las cuales necesitan ser rellenadas para un correcto manejo en RClimdex.

Tabla 9.

Estructura de base de datos INAMHI

ANIO	DIA	1	2	3	4	5	6
1988	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1988	2	0.0	0.0	0.0	2.3	11.4	0.0	0.0
1988	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1988	4	0.0	4.2		1.3	0.9	13.8	0.0
1988	5	11.8	0.5		0.1	0.0		0.0
1988	6	0.0	6.9	2.2	0.3	0.0		0.0
1988	7	0.0	1.9	1.6	0.0	1.1		1.1

Nota: en la tabla se visualiza el formato original de los datos obtenidos. Elaborado por: (INAMHI, 2020)

4.1.4.1.2 Formato Para RClimdex.

Para el análisis de datos meteorológicos de cada estación de estudio es necesario establecer un formato especializado en el cual se requiere de un archivo de texto delimitado por tabulaciones (CSV), en el cual se encuentren todas las variables y datos

en un solo archivo. Se debe reemplazar aquellos datos faltantes o que no se encuentren disponibles con la numeración “-99.9” para que sean identificados por el software, ya que es un requisito indispensable de codificación para realizar el cálculo de los 27 índices de cambio climático.

El nuevo formato, correspondiente a la Tabla 10, dispone de siete columnas, las cuatro primeras especifican la estación meteorológica a la que corresponde el archivo, el año, mes y día. Las siguientes tres columnas describen la variable de estudio que va a ser analizada.

Tabla 10.

Representación de base de datos para análisis en RClimdex

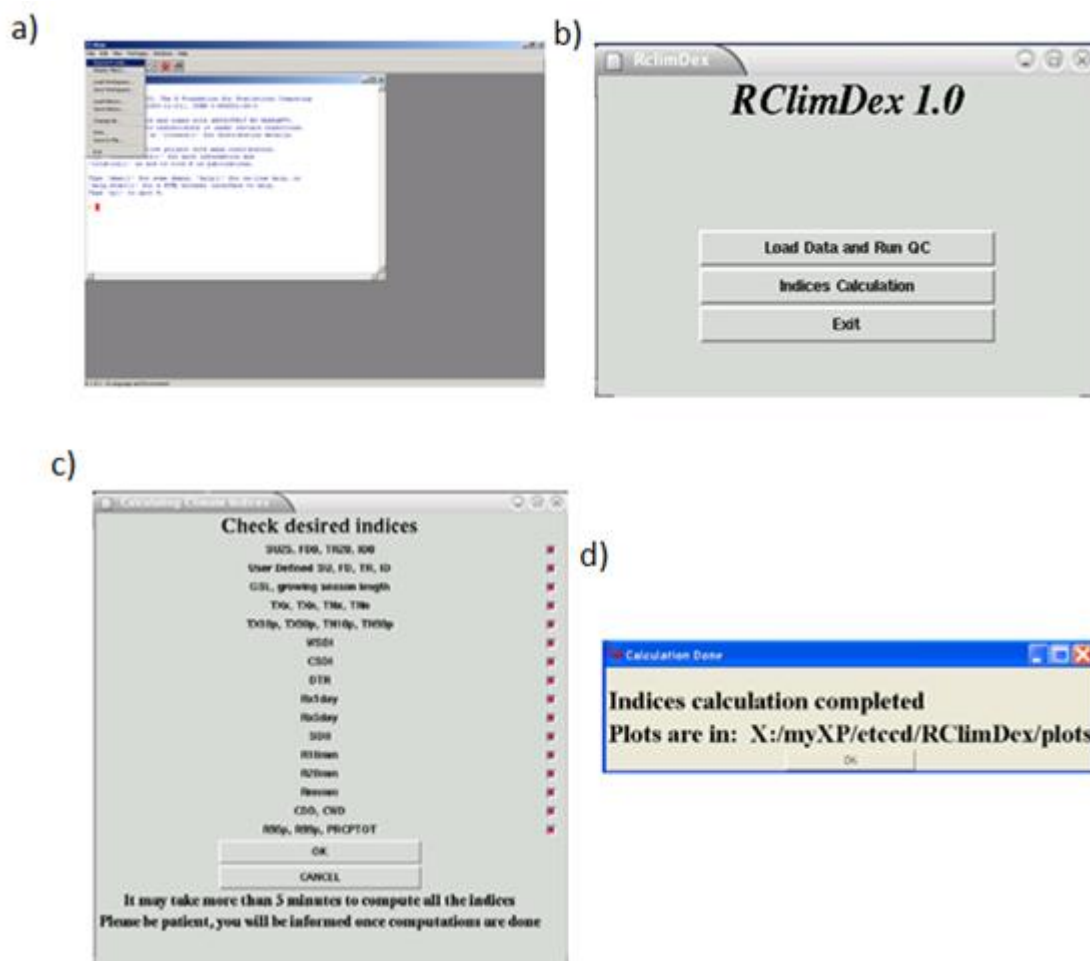
CODIGO	ANIO	MES	DIA	PRECIPITACION	TEMP_MAXIMA	TEMP_MINIMA
M0003	1974	1	2	-99.9	18.2	6.5
M0003	1974	1	3	-99.9	18.3	4.5
M0003	1974	1	4	-99.9	19.3	3.0
M0003	1974	1	5	-99.9	18.2	3.4
M0003	1974	1	6	-99.9	16.0	3.2
M0003	1974	1	7	-99.9	17.7	6.8
M0003	1974	1	8	-99.9	20.3	5.5

Nota: La tabla indica el formato al que fueron transformados los datos. Elaborado por: Tufiño, R. (2020)

Una vez obtenido el formato necesario, se procede a ejecutar el paquete computacional de RClimdex mediante el icono de R, en el cual se colocará la palabra “start”, de tal manera que se podrá visualizar en la pantalla que se muestra en la Figura 8 (a). A continuación, en la gráfica (b), para poder calcular los índices correspondientes, se selecciona “Load Data and Run QC”. Para que la información sea analizada, es necesario la transformación de un formato que el programa pueda leer. Al instante aparecerá una tabla que muestra los índices que el Software va a calcular, gráfica (c) y finalmente, con la gráfica (d) sabremos que los índices han sido calculados correctamente.

Figura 8.

Manual de usuario sobre los pasos a realizar en el manejo del software “RClimdex” (a, b, c y d)



Nota: La imagen muestra los pasos realizados para el cálculo de índices de cambio climático. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

4.1.4.2 Transformación De Formatos De Datos Meteorológicos De La REMMAQ.

La base de datos descargada de la REMMAQ por variable se encuentra como Libro de Excel 97-2003, el cual facilita el procesamiento de los mismos en RStudio, como se puede visualizar en la Tabla 10.

4.1.4.2.1 Formato Inicial REMMAQ.

El contenido de la Tabla 12 muestra las estaciones meteorológicas con sus respectivos datos horarios ubicados en columnas. Así también se puede visualizar que los datos obtenidos de la REMMAQ cuentan con 9 estaciones meteorológicas, de las cuales se ha tomado para el presente estudio 4 que contaban con más del 70% de datos como se observa en la Tabla 11, las cuales fueron: Carapungo, Cotocollao, El Camal y Tumbaco.

Tabla 11.

Porcentaje de Datos faltantes en las distintas variables de la REMMAQ

Datos Vacíos	Totales	Belisario	Carapungo	Centro	Cotocollao	ElCamal	Guamaní	LosChillos	San Antonio	Tumbaco
Precipitación	143904	1586	2177	127374	2927	22493	43547	6481	116228	1809
Porcentaje vacíos	%	1,10	1,51	88,51	2,03	15,63	30,26	4,50	80,77	1,26
Presión Barométrica	152688	2302	4151	131209	2788	20754	114943	2705	116293	6290
Porcentaje vacíos	%	1,51	2,72	85,93	1,83	13,59	75,28	1,77	76,16	4,12
Humedad Relativa	143904	1836	3539	130907	23651	20371	114910	1403	116221	1962
Porcentaje vacíos	%	1,28	2,46	90,97	16,44	14,16	79,85	0,97	80,76	1,36
T. Atmosférica	143904	1864	4282	130907	3835	20374	114909	1431	116230	1957
Porcentaje vacíos	%	1,30	2,98	90,97	2,66	14,16	79,85	0,99	80,77	1,36
V. del viento	143904	1886	4698	130903	7675	20954	115210	1643	116218	1966
Porcentaje vacíos	%	1,31	3,26	90,97	5,33	14,56	80,06	1,14	80,76	1,37
D. del viento	143904	3082	6269	130905	9549	20864	115210	2079	116217	1992
Porcentaje vacíos	%	2,14	4,36	90,97	6,64	14,50	80,06	1,44	80,76	1,38
Porcentaje Datos Faltantes (%)	872208	1,44	2,88	89,68	5,78	14,42	70,94	1,80	79,96	1,83

Nota: La tabla muestra el porcentaje de datos vacíos de las 9 estaciones del Municipio de Quito. Elaborado por: REMMAQ, (2020)

Tabla 12.

Estructura de base de datos REMMAQ

Fecha	Belisario	Carapungo	Centro	Cotocollao	ElCamal	Guamaní	LosChillos	SanAntonio	Tumbaco
01/01/2004 0:00	9,93	12,73		10,41	12,57		9,95		12,36
01/01/2004 1:00	9,14	12,58		9,76	12,16		8,77		11,87
01/01/2004 2:00	8,71	12,12		9,49	11,87		8,35		11,82
01/01/2004 3:00	8,63	11,94		9,44	11,38		8,01		11,62

Fecha	Belisario	Carapungo	Centro	Cotocollao	ElCamal	Guamaní	LosChillos	SanAntonio	Tumbaco
01/01/2004 4:00	10,18	11,94		9,82	11,31		7,95		11,02
01/01/2004 5:00	10,54	11,64		9,64	11,08		7,39		10,39
01/01/2004 6:00	10,98	11,88		9,56	11,45		6,8		10,16

Nota: La tabla muestra el formato inicial de datos del municipio de Quito. Elaborado por: REMMAQ, (2020)

4.1.4.2.2 Formato Para RStudio.

Para el análisis de datos en RStudio se agregaron 4 columnas adicionales en base a la columna principal de fecha, para así facilitar el manejo del programa y para la obtención de gráficos por año, mes, día y hora. De la misma manera como se puede visualizar en la Tabla 13, las 4 estaciones meteorológicas en cuestión son las que se utilizaron en el presente estudio, puesto que existe una mayor cantidad de datos.

Tabla 13.

Representación de datos para análisis en RStudio

Fecha	Ano	Mes	Día	Hora	Carapungo	Cotocollao	El Camal	Tumbaco
01/01/2004 0:00	2004	1	1	0	12,73	10,41	12,57	12,36
01/01/2004 1:00	2004	1	1	1	12,58	9,76	12,16	11,87
01/01/2004 2:00	2004	1	1	2	12,12	9,49	11,87	11,82
01/01/2004 3:00	2004	1	1	3	11,94	9,44	11,38	11,62
01/01/2004 4:00	2004	1	1	4	11,94	9,82	11,31	11,02
01/01/2004 5:00	2004	1	1	5	11,64	9,64	11,08	10,39
01/01/2004 6:00	2004	1	1	6	11,88	9,56	11,45	10,16

Nota: La tabla indica el formato necesario para el análisis de datos. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

4.1.4.2.3 Script Utilizado Para Análisis De Datos Meteorológicos En RStudio.

A continuación, se muestra en detalle uno de los códigos utilizados en RStudio para el procesamiento de datos, los mismos que fueron ejecutados para cada una de las estaciones involucradas en el presente estudio y sus variables correspondientes.

- Cargar las librerías necesarias para la lectura de datos y ejecución de resultados gráficos

```
library("ggplot2")
library("dplyr")
library("gplots")
```

- Cargar datos de la estación y variable correspondiente, en este caso temperatura mínima de Carapungo

```
#REMAQ20anos <-REMAQ20anos <-
read_excel("C:/Users/KAREN/Desktop/Tmin Remmaq/REMAQ20anos.xlsx",
+   col_types = c("date", "numeric", "numeric",
+                 "numeric", "numeric", "numeric",
+                 "numeric", "numeric", "numeric")
View(REMAQ20anos)
```

- Análisis gráfico de la data y eliminación de los datos erróneos

```
plot(REMAQ20anos$Fecha, REMAQ20anos$Carapungo, main = "Carapungo
Station",
      ylab = "Min Temperature [°C]", xlab = " ")
```

- Analizar datos con temperatura >0

```
tminCarapungo <- subset(REMAQ20anos, Carapungo>0 )
summary(tminCarapungo)
```

- Gráficos sin quitar daros mediante Boxplots mensuales, anuales y anuales

```
boxplot(tminCarapungo$Carapungo ~ tminCarapungo$Mes, main="Carapungo
2004-2019",
        ylab="Min Temperature [°C]", xlab= "Month")

boxplot(tminCarapungo$Carapungo ~ tminCarapungo$Ano, main="Carapungo
2004-2019",
        ylab="Min Temperature [°C]", xlab= "Year")

hist(tminCarapungo$Carapungo)
```

- Analisis de la temperatura mínima promedio

```
maxyear <- max(tminCarapungo$Ano)
minyear <- min(tminCarapungo$Ano)
rangeYear <- maxyear-minyear
```

- Utilizar rangeYear si están disponibles todos los años. En este caso se quitaron 2 años de forma manual

```
##Range Year-2 (quitar los 2 años a mano)
bins <- cut (tminCarapungo$Mes, breaks = 16)
```

- Calculo el promedio de temperatura por bin

```
miti <-by(tminCarapungo$Mes, bins, median)
mitll <- as.array(miti)
mitllu <-cbind(mitll)
```

- Cálculo de la suma de temperatura mínima por bin

```
acum <-by(tminCarapungo$Carapungo, bins, mean)
acuml <- as.array(acum)
acumll <-cbind(acuml)
```

- Resumen de los datos obtenidos

```
EstacionarioCarapungo <- cbind(mitllu, acumll)
EstacionarioCarapungo <- cbind(mitllu, acumll/rangeYear)
EstacionarioCarapungo <- as.data.frame(EstacionarioCarapungo)
```

- Grafica de los datos obtenidos

```
plot(EstacionarioCarapungo, type = "h",lwd = 12, col="coral3", lend=1,
xlim=c(1,12),
main= "Carapungo 2004-2019", xlab = "Month", ylab = "Mean Min
Temperature [°C]", ylim = c(5,14))
```

4.1.5 Control De Calidad De Los Datos

Para proceder con el control de calidad de los datos fue necesario seguir una serie de pasos, en las que se incluye la transformación de formatos en lenguaje de R y la limpieza correspondiente de datos atípicos para un análisis estadístico posterior.

4.1.5.1 Análisis De Series De Tiempo Sin Limpiar.

Para el análisis de series de tiempo en cada una de las variables de estudio se utilizó el programa RStudio, con scripts específicos para cada una de ellas, en las cuales se puede visualizar de manera gráfica cómo se encuentra la base de datos histórica de las estaciones correspondientes con el objetivo de determinar qué datos eran totalmente válidos y cuáles debían ser eliminados para un mejor manejo estadístico posterior.

Este proceso se realizó minuciosamente serie por serie, sin el relleno de datos faltantes y sin desechar automáticamente datos extremos, ya que para la presente investigación no fue estrictamente necesario.

Los errores más comunes que se encontraron y corrigieron se muestran en las Figuras 9, 10, 11 y 12.

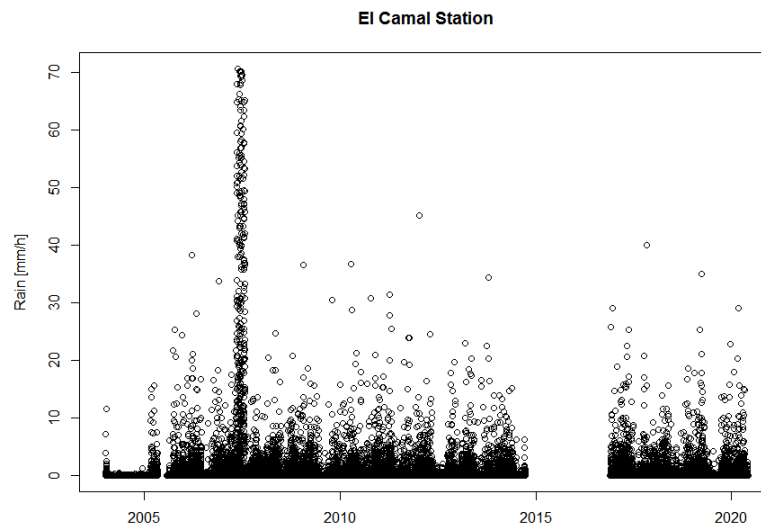
4.1.5.1.1 Serie De Datos Sin Limpiar Para Precipitación.

Los datos correspondientes a la precipitación tuvieron un análisis más estricto debido al cuidado necesario de no perder información de eventos extremos.

Para la Figura 9, se eliminaron períodos atípicos, generados posiblemente por variaciones de voltaje, descalibración manual u otras.

Figura 9.

Datos crudos de precipitación, estación El Camal



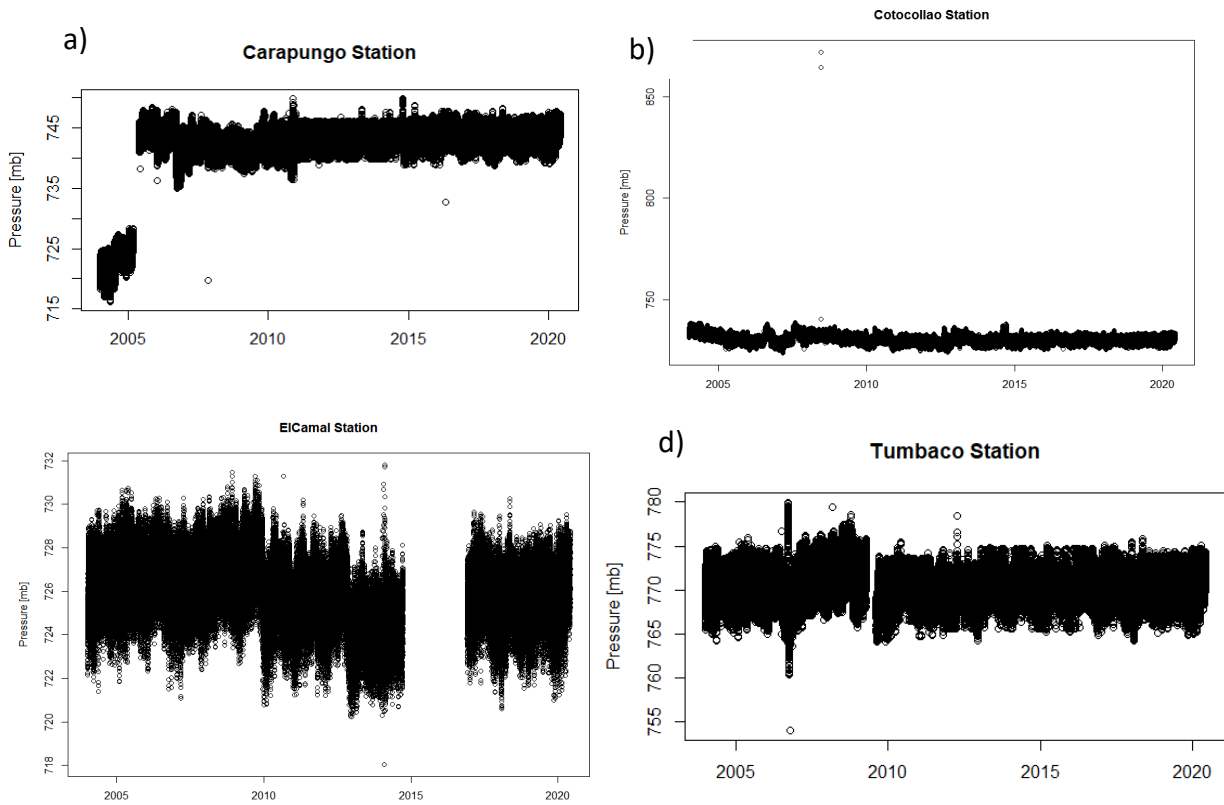
Nota: la figura muestra la representación de datos crudos de precipitación en El Camal. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

4.1.5.1.2 Serie De Datos Sin Limpiar Para Presión.

Para la Figura 10, a) se muestra un error típico de bias, el cual se puede producir cuando se cambia de equipo. Para b) se puede observar datos atípicos, producidos tal vez por caídas o movimientos inesperados sobre la estación. En c) se visualiza Gap, o vacíos de información, debido a que se realizó un estudio de eventos extremos, y no se rellenaron los datos en cuestión. Ya que la interpolación u otro tipo de relleno, se realizaría con datos promedios, que pueden hacer pensar que el clima tiene un comportamiento promedio, y por lo tanto no se reflejaría sus tendencias a valores extremos. De esta manera evitamos falsear la información y que los resultados demuestren un comportamiento real en cada una de las variables. Mientras que en d) se observa un dato atípico, y una posible descalibración o movimiento de la estación meteorológica.

Figura 10.

Datos crudos de precipitación de las estaciones de a) Carapungo, b) Cotocollao, c) El Camal y d) Tumbaco.



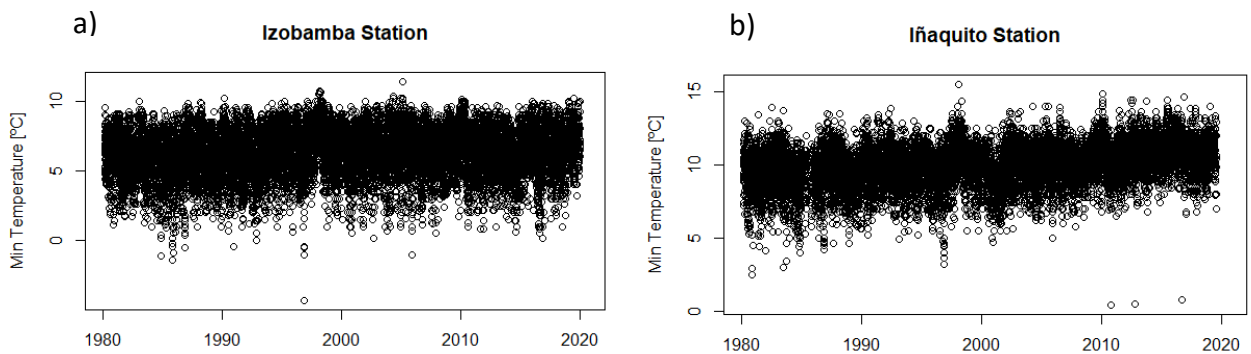
Nota: La figura muestra la representación de datos crudos de precipitación. Elaborado por: Santillán K., Zamora E

4.1.5.1.3 Serie De Datos Sin Limpiar Para Temperatura Mínima.

Para la temperatura mínima en la Figura 11, a) y b) se pueden observar la presencia de datos atípicos, claramente marcados al final de cada uno de ellos.

Figura 11.

Datos crudos de Temperatura mínima de a) Izobamba y b) Iñaquito



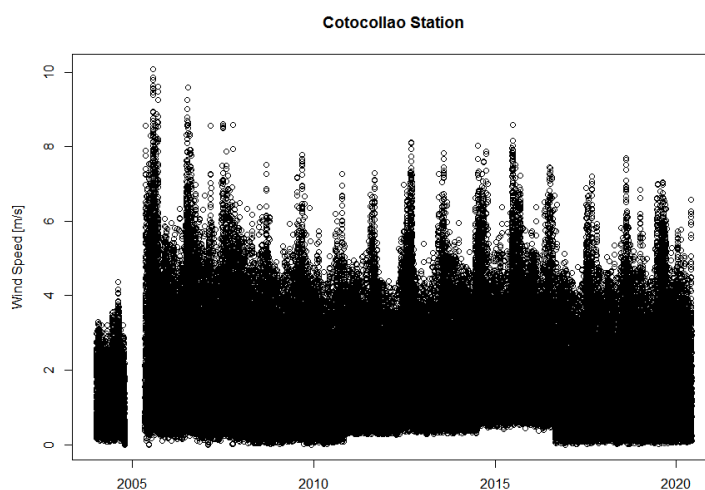
Nota: La figura muestra la representación de datos crudos de temperatura mínima. Elaborado por: Santillán K., Zamora E

4.1.5.1.4 Serie De Datos Sin Limpiar Para Velocidad Del Viento.

En la Figura 12, se pueden observar vacíos de información, así como también una posible descalibración de equipos, lo cual provoca la diferencia de valores en la parte inferior del gráfico.

Figura 12.

Datos crudos de Velocidad del viento, estación Cotocollao



Nota: la figura muestra la representación de datos crudos de velocidad del viento. Elaborado por: Santillán K., Zamora E

4.1.6 Limpieza De Datos Atípicos

Después de verificar la base histórica de cada una de las variables con RStudio y mediante las gráficas obtenidas se procedió a la limpieza de datos atípicos, ya sea con el programa o de forma manual para que estos puedan ser reportados en cada uno de los análisis realizados.

4.1.6.1 Limpieza De Datos Atípicos En Precipitación.

En la estación meteorológica de El Camal, en la variable de precipitación se realizó la limpieza de datos atípicos correspondientes a los años 2007 y 2014. Siendo eliminados completamente.

4.1.6.2 Limpieza De Datos Atípicos En Presión.

Para la presión, todo valor eliminado del estudio se encuentra reportado en la Tabla 14.

Tabla 14.

Datos atípicos de presión

PRESIÓN					
Estación	Año	Mes	Día	Hora	mb
Carapungo	2004	1-12	----	----	715-730
	2005	1-12	----	----	715-730
	2007	11	07	17:00	719,7
	2016	05	02	13:00	732,77
Cotocollao	2008	06	18	15:00	871,72
	2008	06	18	16:00	864,37
El Camal	2014	01	31	16:00	718,05
Tumbaco	2006	09	1-30	00:00	>770.8
	2006	10	1-31	23:00	<770.8

Nota: La tabla muestra el reporte de datos atípicos obtenidos después del control de calidad en presión. Elaborado por: Santillán K., Zamora Esteban

4.1.6.3 Limpieza De Datos Atípicos En Temperatura Mínima.

Los datos eliminados en la temperatura mínima se encuentran reportados en la Tabla 15.

Tabla 15.

Datos atípicos de temperatura mínima

TEMPERATURA MÍNIMA					
Estación	Año	Mes	Día	Hora	° C
Izobamba	1996	11	20	00:00	-4,3
	2010	10	27	00:00	0.4
Iñaquito	2012	10	13	00:00	0.5
	2016	9	22	00:00	0.8

Nota: La tabla muestra el reporte de datos atípicos obtenidos después del control de calidad en temperatura mínima. Elaborado por: Santillán K., Zamora Esteban

4.1.6.4 Limpieza De Datos Atípicos En Velocidad Del Viento.

Para la estación de Cotocollao, en la variable velocidad del viento se realizó limpieza de datos atípicos del año 2004. Los cuales fueron eliminados en su totalidad.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Climatología

La climatología se refiere al estudio de los promedios encontrados en largas series de datos, en este caso, con más de 40 años para las estaciones del INAMHI, y de 16 años para las de la REMMAQ. Se analizaron las variables una por una explicando su comportamiento de ciclo diurno (horario) en este caso se tomaron en cuenta solamente las estaciones de la REMMAQ, debido a que estas brindan información horaria de 0 a 24 horas. Se analiza también un estudio climatológico estacional (mensual) y finalmente en anual.

5.1.1 Precipitación

5.1.1.1 Ciclo Diurno De La Precipitación.

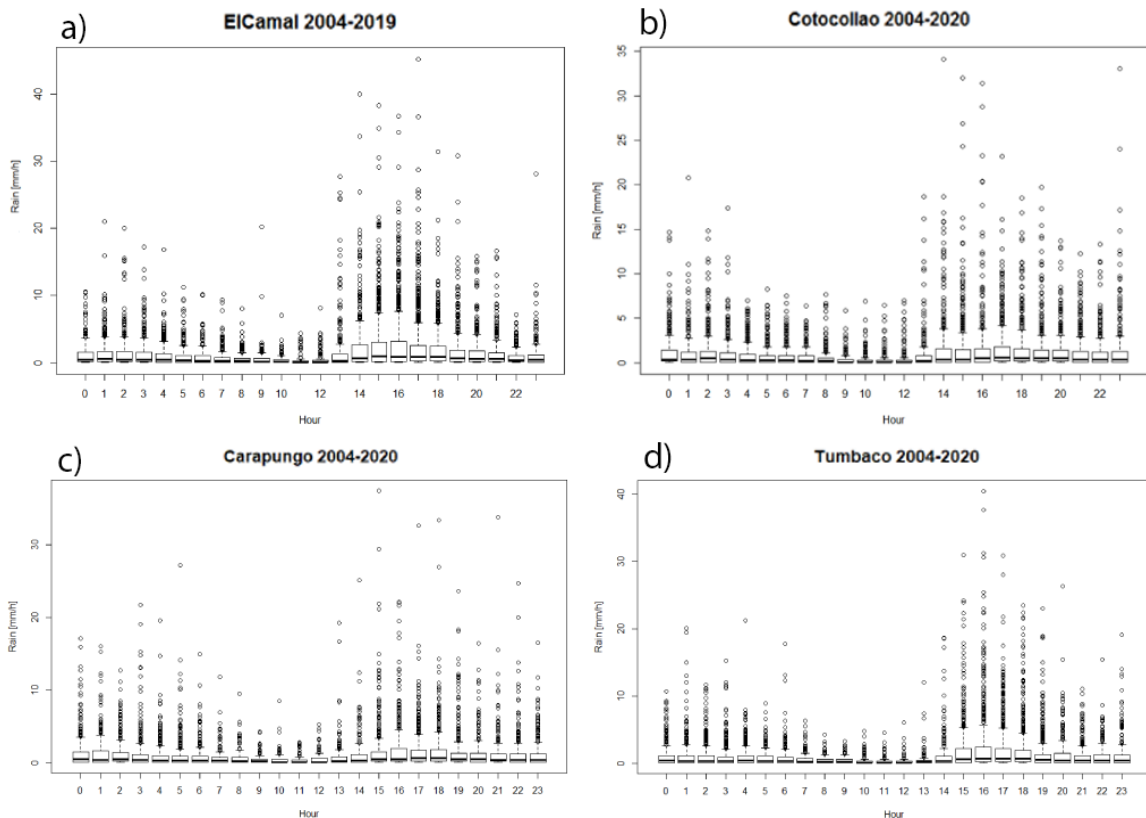
“El ciclo diurno o estudio a nivel horario, es sin duda uno de los elementos de variabilidad climática más relevantes para determinar los mecanismos dinámicos y termodinámicos dominantes en la formación del clima regional” Trenberth et al. (2003).

Se analizó únicamente los datos proporcionados por la REMMAQ debido a que estas estaciones cuentan con datos horarios, los cuales se muestran en los siguientes boxplots.

Se observa que la tendencia para las estaciones con mayor pluviosidad como es el caso de a) Tumbaco y b) Cotocollao, se registran valores de tendencia entre 0 y 3 mm/h, pero se llegan valores de hasta 50mm/h en promedio diario en a) El Camal y en b) Cotocollao, de hasta 2.5 mm/h en promedio diario. En las de menor pluviosidad promedio diaria, como es el caso de c) Carapungo y d) Tumbaco, se registran tendencias de entre 0 y 2 mm/h, con valores dispersos de hasta 40 mm.

Figura 13.

Representación de las precipitaciones mediante boxplot horario de 0 a 23 horas en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco



Nota: La figura muestra el reporte horario de precipitaciones. Elaborado por: Santillán K., Zamora Esteban

Se puede observar en la Figura 13, que desde las 00:00 am hasta las 05:00 y desde las 13:00 p.m. hasta las 18:00 p.m. se registra la mayor cantidad de precipitación tanto en a) El Camal, b) Cotocollao, c) Carapungo y d) Tumbaco. Asimismo, de 8:00 a.m. a 12:00 p.m. se muestra la disminución general en los mm/h de precipitación.

5.1.1.2 Análisis Estacional De La Precipitación.

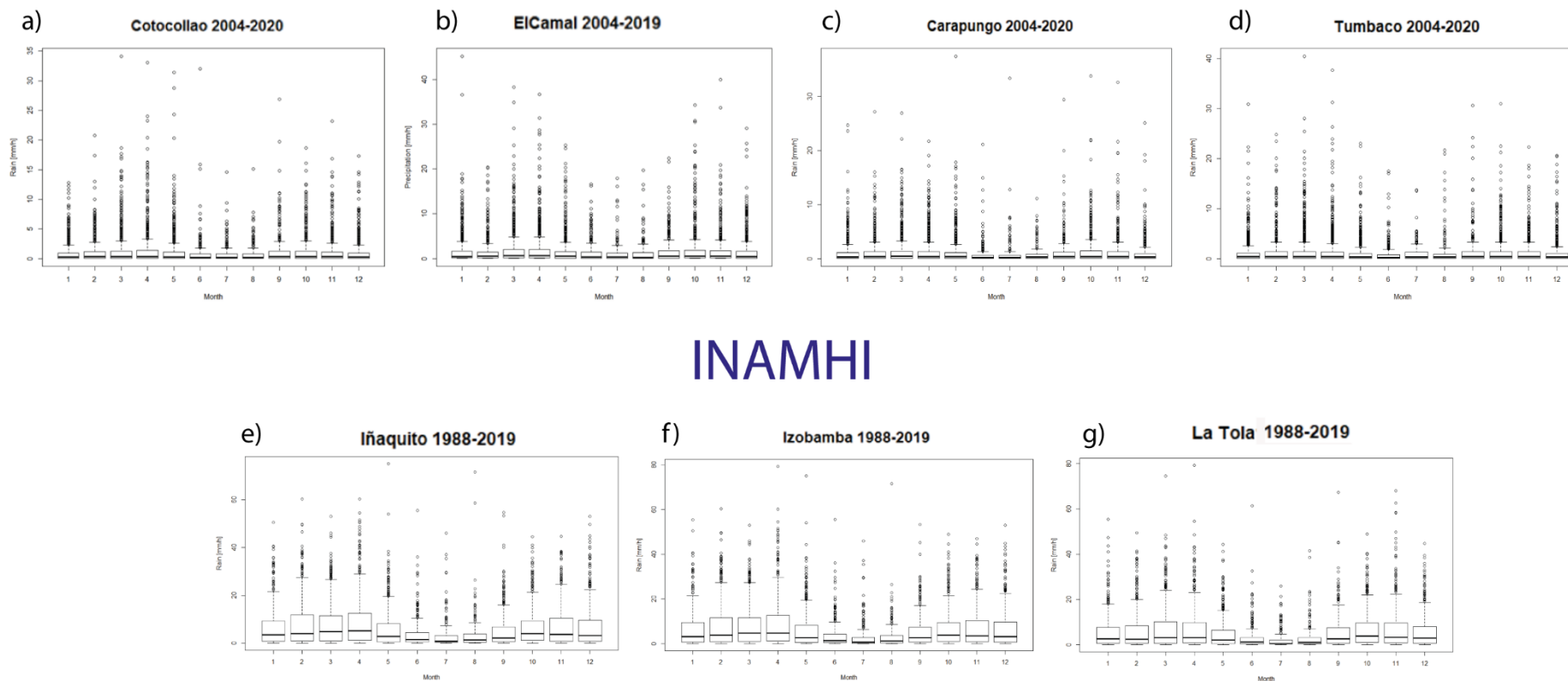
El análisis estacional también llamado mensual se refiere a las variaciones promedio encontradas en las series de tiempo, para poder verificar la influencia de la estación: lluviosa o seca, marcada por los equinoccios de marzo y septiembre.

El análisis estacional mensual indica un análisis de la distribución de las precipitaciones que ocurren en la ciudad de Quito en los meses de enero a diciembre. Se analizaron datos mensuales de las distintas estaciones estudiadas y se las representó mediante un boxplot en la Figura 14 y un histograma en la Figura 15 en el caso de las precipitaciones acumuladas.

Figura 14.

Representación de las precipitaciones mediante boxplot intermensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola

REMMAQ



INAMHI

Nota: La figura muestra los resultados mensuales de precipitaciones registradas. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

La ciudad de Quito, muestra dos etapas donde la lluvia aumenta, estos inician al finalizar febrero, marzo y duran todo abril y mayo; el segundo, empieza en septiembre y dura todo octubre y noviembre posteriormente baja paulatinamente en diciembre, Entre estos meses existe una transición que tiene días secos y lluviosos los cuales son variables; enero, febrero y agosto.

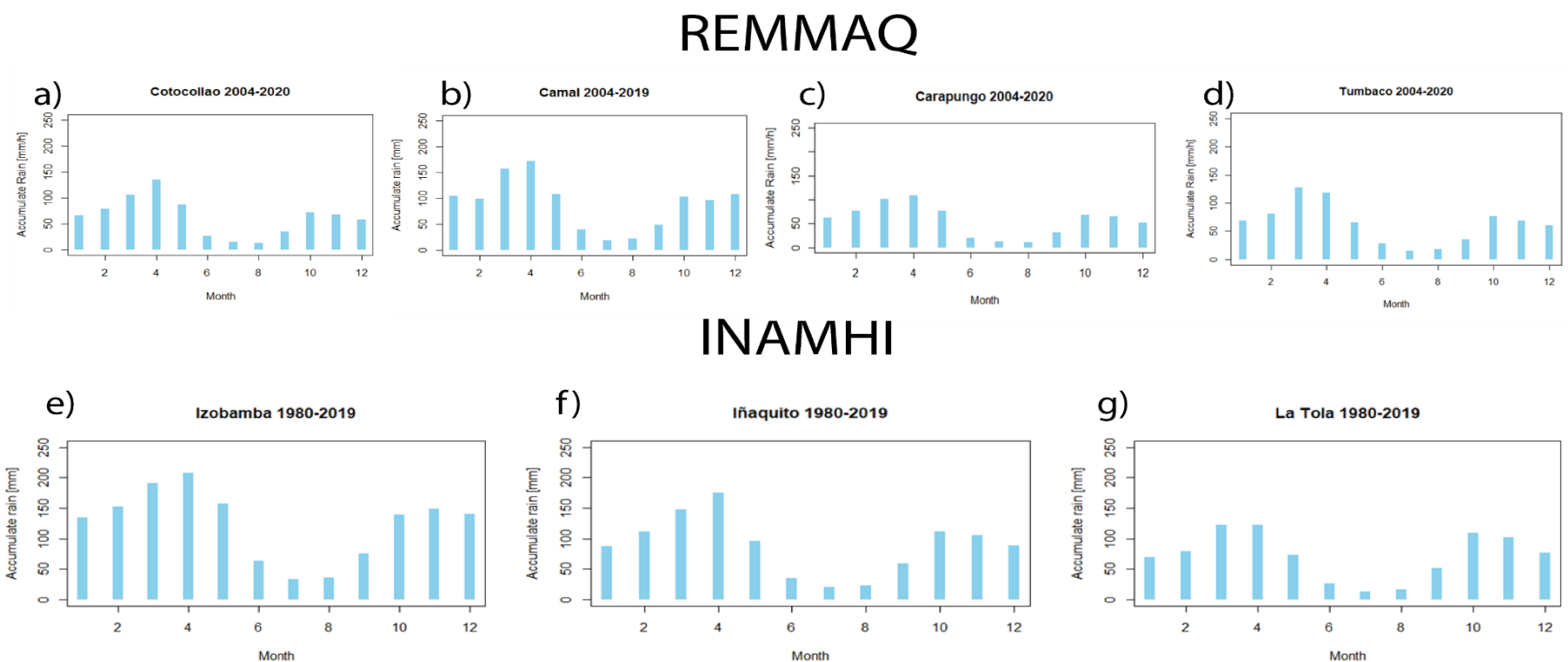
Los meses más secos se registran en verano durante los meses de junio y julio, que se conocen en Quito como meses de verano en los cuales se determinó que la lluvia no sobrepasa los 6 mm.

Las estaciones e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola, muestran la precipitación más alta en la capital con valores de tendencia de entre 0 y 10 mm. Y con extremos que sobrepasan los 60 mm. A diferencia de las estaciones a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo y d) Tumbaco, en las cuales la tendencia se mantiene entre 0 y 2 mm. Esto muestra también que en Iñaquito existen precipitaciones más fuertes en el mes de abril y noviembre estas corresponden a las notas de prensa sobre las inundaciones en la plataforma gubernamental expuesta en la Figura 5.

El Distrito Metropolitano de Quito en pocos kilómetros muestra variaciones significativas estacionales ya que en el norte en la estación de Carapungo la presencia de la precipitación es reducida vs Iñaquito que también ubicada muy cerca exhibe como una de las estaciones con mayor precipitación.

Figura 15.

Representación de las precipitaciones mediante histograma intermensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola



Nota: La figura muestra los resultados mensuales de precipitaciones registradas. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

Observando el histograma que nos refleja la Figura 15, se evidencia que la estación con mayor pluviosidad se da en e) Iñaquito, que registra valores de hasta 79.200 mm/mes, y mínimos de 0 mm/mes. Le sigue la estación f) Izobamba, b) El Camal y g) La Tola. Mientras que, la estación más seca es la c) Carapungo.

La ubicación geográfica se destaca en el comportamiento climático en los valles de Los Chillos y los valles de Tumbaco, hacen que como se muestra en la figura g) La Tola, existan precipitaciones de hasta 120mm, pero en julio llegan a ser uno de los más secos a nivel general de las estaciones estudiadas.

La estación de Izobamba es la que muestra más cantidad acumulada de precipitación debido a su ubicación geográfica que bordea la ciudad de Quito y nos puede revelar información pluviométrica más precisa ya que a su alrededor no se ha desarrollado urbanidad en gran escala permitiendo así una entrega de datos confiables.

5.1.1.3 Análisis Anual De La Precipitación.

La Figura 16 muestra la precipitación histórica representada en boxplots de las estaciones INAMHI y REMMAQ con valores que oscilan entre años 1980 al 2019

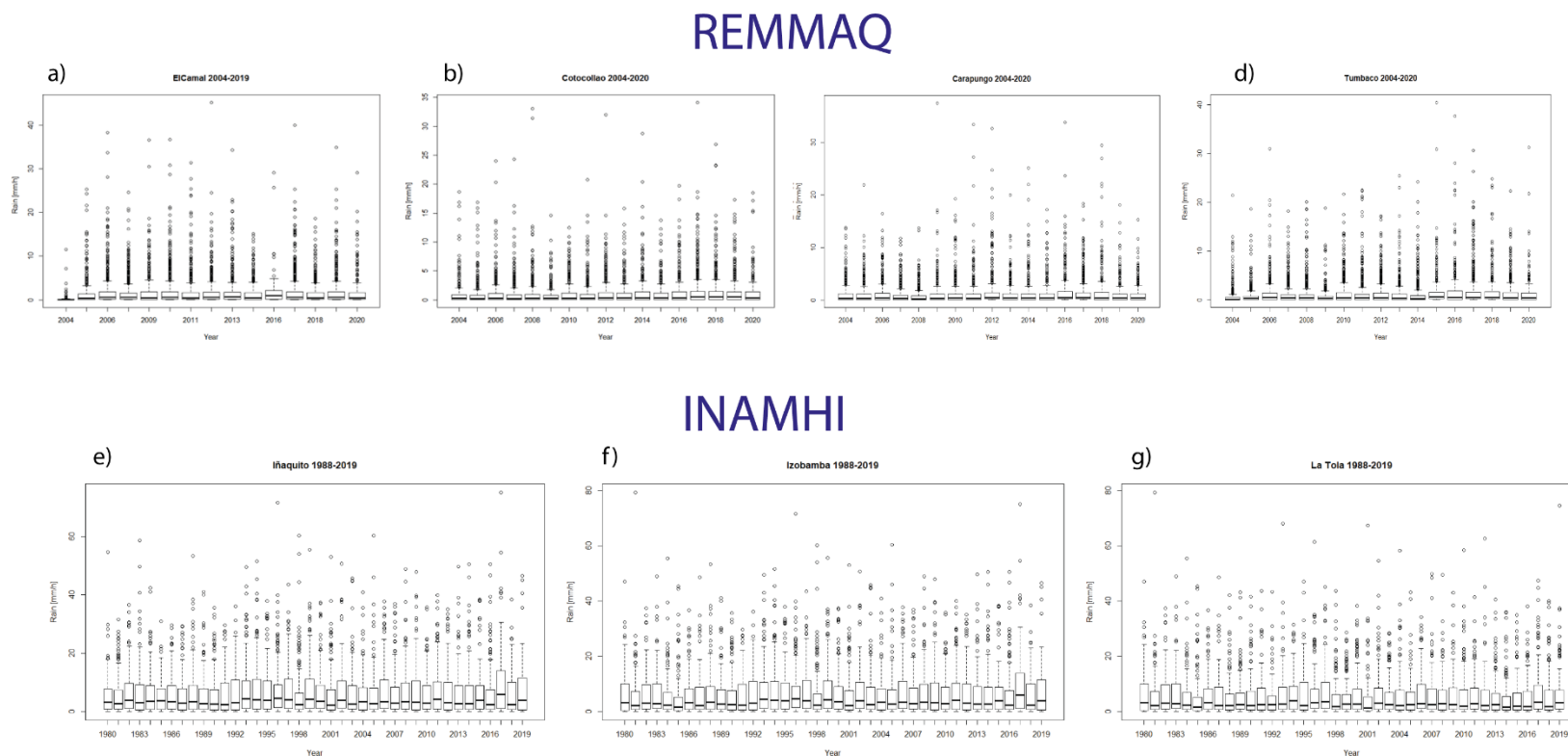
La estación c) Carapungo, es la que muestra menor cantidad anual promedio de precipitaciones, su tendencia se encuentra entre los 0 y 2 mm. Con un incremento en 2010 y 2015.

La estación con mayor pluviosidad promedio anual registrada es f) Izobamba con tendencia entre 0 y 8,5 mm.

Adicionalmente, al apreciar la Figura 15, se puede observar que no existe tendencia al incremento o al decremento de la precipitación. De alguna manera, las temporadas lluviosas se compensan con las secas.

Figura 16.

Representación de las precipitaciones mediante boxplot anual de las estaciones de a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola



Nota: La figura muestra los resultados anuales de precipitaciones registradas. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

5.1.2 Temperatura

5.1.2.1 Ciclo Diurno De La Temperatura.

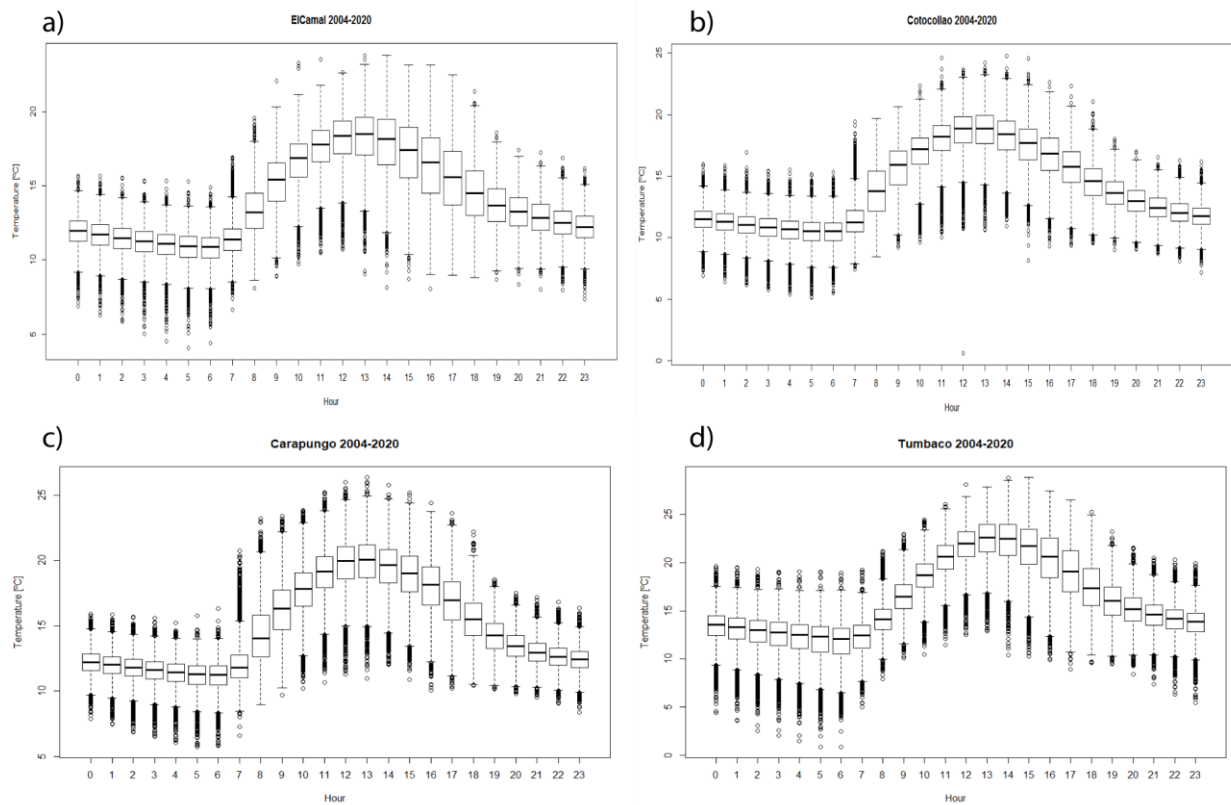
En la Figura 17 se evidencia claramente como la temperatura varía a lo largo del día, las temperaturas más bajas registradas en la ciudad de Quito en todas las estaciones, son de 0:00 a 6:00 horas, La temperatura mínima suele darse en Quito entre las 5 am y las 7 am. La madrugada en el DMQ muestra ser realmente fría debido a la ausencia de radiación solar, en el rango de 11°C a 12 °C, esto a lo largo del día continúa variando, tomando una temperatura más cálida de 07:00 a 13:00 p.m., mientras que a las 12:00 pm se llega al máximo de temperatura que oscila de 18°C a 22°C.

La salida del sol fuerza radiactivamente el incremento de la temperatura, luego de lo cual la radiación solar disminuye su ángulo de incidencia, calentando la tierra de manera disminuida. Asimismo, la superficie caliente, comienza a emitir calor, disminuyendo la temperatura comportamiento que se evidencia de manera continua incluso durante horas de la noche, hasta las 6 a.m., logrando su punto más bajo al amanecer. Este comportamiento se repite para todas las estaciones estudiadas.

Tumbaco es la estación que llama la atención ya que su ciclo diurno ya que su temperatura más baja es aproximadamente 13,5°C y la más alta de las cuatro estaciones con 22°C.

Figura 17.

Representación de la temperatura mediante boxplot diario de 0 a 23 horas en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco



Nota: La figura muestra el reporte horario de temperaturas. Elaborado por: Santillán K., Zamora Esteban

5.1.2.2 Ciclo Estacional De La Temperatura.

Se tomaron los datos históricos de enero a diciembre y se los representó en histogramas para lograr analizar el comportamiento de la temperatura máxima y mínima. Para el caso de la temperatura en la REMAQ, se debió realizar un script para su posterior transformación de temperaturas horarias.

En la Figura 18 se observa el histograma de las temperaturas máximas donde la estación d) Tumbaco, muestra ser la de mayor temperatura máxima llegando a los 23 °C en septiembre, seguida de la estación g) La Tola.

La estación f) Izobamba, se muestra como la de menor temperatura máxima con 16°C en su pico más alto.

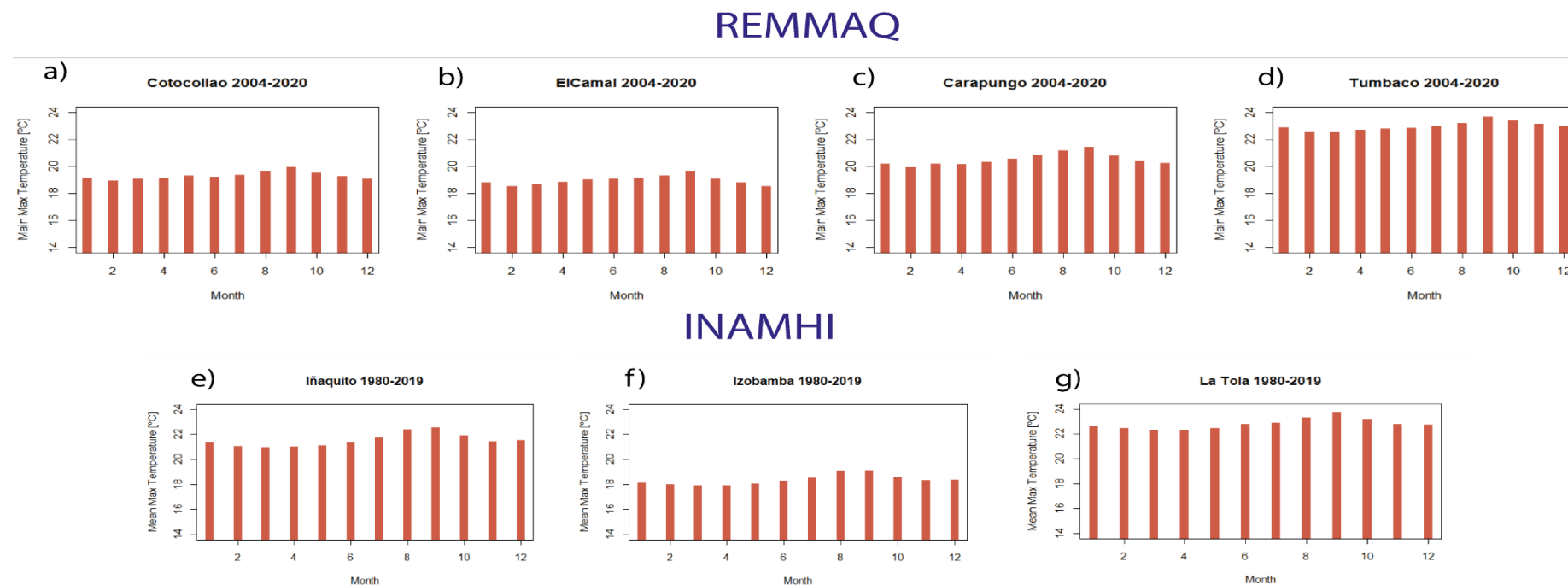
Lo común es que todas las estaciones aumentan su temperatura durante el verano.

Se analizó la información que brinda la gráfica y se puede expresar en un análisis temporal que; entre las variaciones naturales debido a la elevación sobre el nivel del mar, la media más baja la muestra f) Izobamba, ubicada a los 3058 msnm. Lo que llega a sorprender es la estación g) La Tola con 2480msnm., desde el año 1980 hasta 2007 ostentaba ser la estación con mayor temperatura máxima. Mientras que d) Tumbaco, cuya altura es de 2331msnm. se consolida desde el año 2008 como la estación más cálida hasta la actualidad.

5.1.3 Temperatura Máximas

Figura 18.

Representación mediante histograma de la temperatura máxima intermensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola



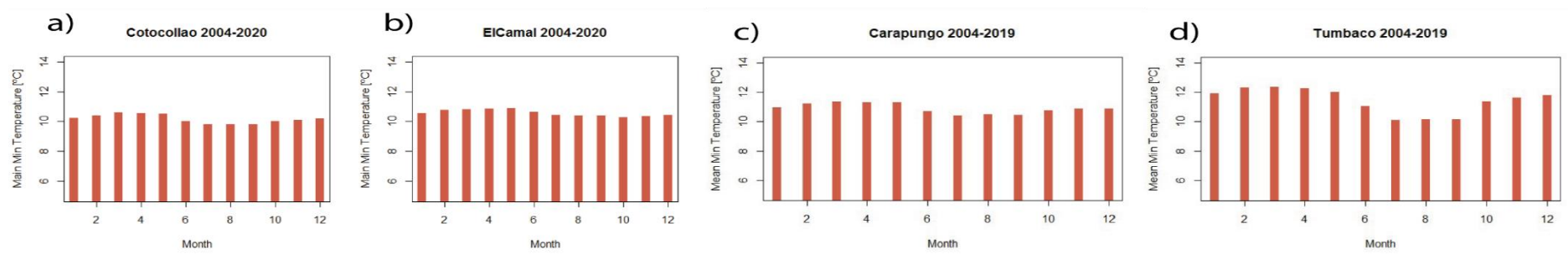
Nota: La figura muestra los resultados mensuales de temperatura máxima registrada. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

5.1.4 Temperatura Mínimas

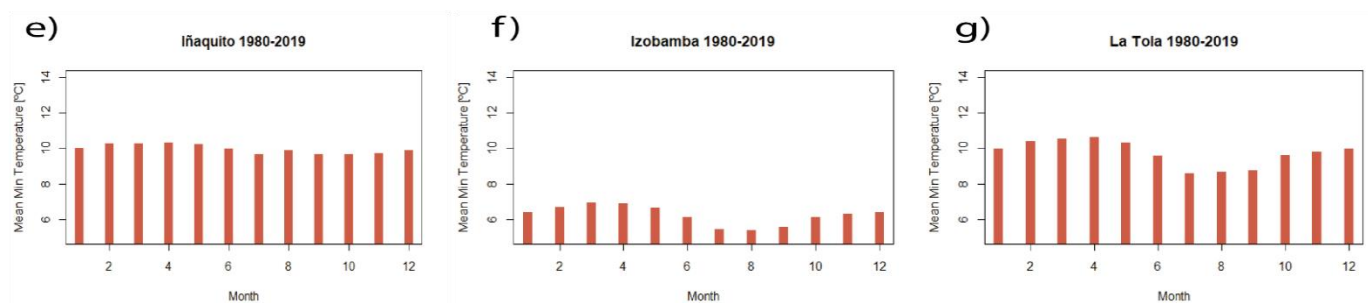
Figura 19.

Representación mediante histograma de la temperatura mínima intermensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola

REMMAQ



INAMHI



Nota: La figura muestra los resultados mensuales de temperatura mínima registrada. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

Los meses con menores temperaturas mínimas corresponden a los de verano junio-julio-agosto, en donde se registra la menor cantidad de humedad relativa, y por lo tanto disminuye la capacidad de la atmósfera de retener calor. Mientras que, en los meses lluviosos de marzo y septiembre, las temperaturas mínimas aumentan.

Este efecto de disminución de temperatura es mucho menor en las estaciones urbanas de a) Cotocollao, f) Ñaquito y b) El Camal. Los autores atribuyen este efecto de calentamiento al Efecto Isla de Calor urbana, que se caracteriza en la liberación de calor acumulado por las construcciones de concreto y asfalto. Esta liberación de calor, provoca que exista un incremento de temperaturas mínimas en horarios de la noche.

Se evidencia que al igual que la temperatura máxima y siendo lo esperado las estaciones de d) que varía entre los 10 y 12 °C y f) que varía entre los 5 y 7 °C son la de mayor y menor temperatura mínima promedio respectivamente.

Los resultados promedio de temperatura mínima Inter horario obtenidos en los diferentes histogramas son similares en cuanto al mes julio en el que todos los valores son más bajos debido a que en verano las temperaturas nocturnas descienden en toda la ciudad.

En el boxplot se puede observar el comportamiento horario de la temperatura media horaria en la estación de Cotocollao. La salida del sol forza radiativamente el incremento de la temperatura logrando su máximo a la 1pm. Luego de lo cual la radiación solar disminuye su ángulo de incidencia, calentando la tierra de manera disminuida. Asimismo, la superficie caliente, comienza a emitir calor, disminuyendo la temperatura comportamiento que se evidencia de manera continua incluso durante horas de la noche, hasta las 6 a.m., logrando su punto más bajo al amanecer. Este comportamiento se repite para todas las estaciones estudiadas.

Los resultados muestran variaciones de 11 °C y 12 °C para las estaciones a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito y g) La Tola, mientras que para la estación f) Izobamba se puede visualizar un rango de temperatura mínima de entre 6 y 7 °C.

5.1.4.1 Ciclo Anual De La Temperatura.

En los boxplot de las Figuras 20 y 21 se puede observar el comportamiento anual de la temperatura máxima y mínima.

Existen aumentos de temperatura máxima históricas según la Figura 20 se puede observar que, en los años 1987,1990, 1992, 1998, 2001, 2015, 2016 y 2019 son años donde notable hay una variación superior entre 0,5 °C y 1 °C, con respecto a los demás.

El año 2016, que sufrió la influencia de un intenso episodio de El Niño, registrado en (CIIFEN) Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno del niño, existen variaciones significativas para las temperaturas máximas

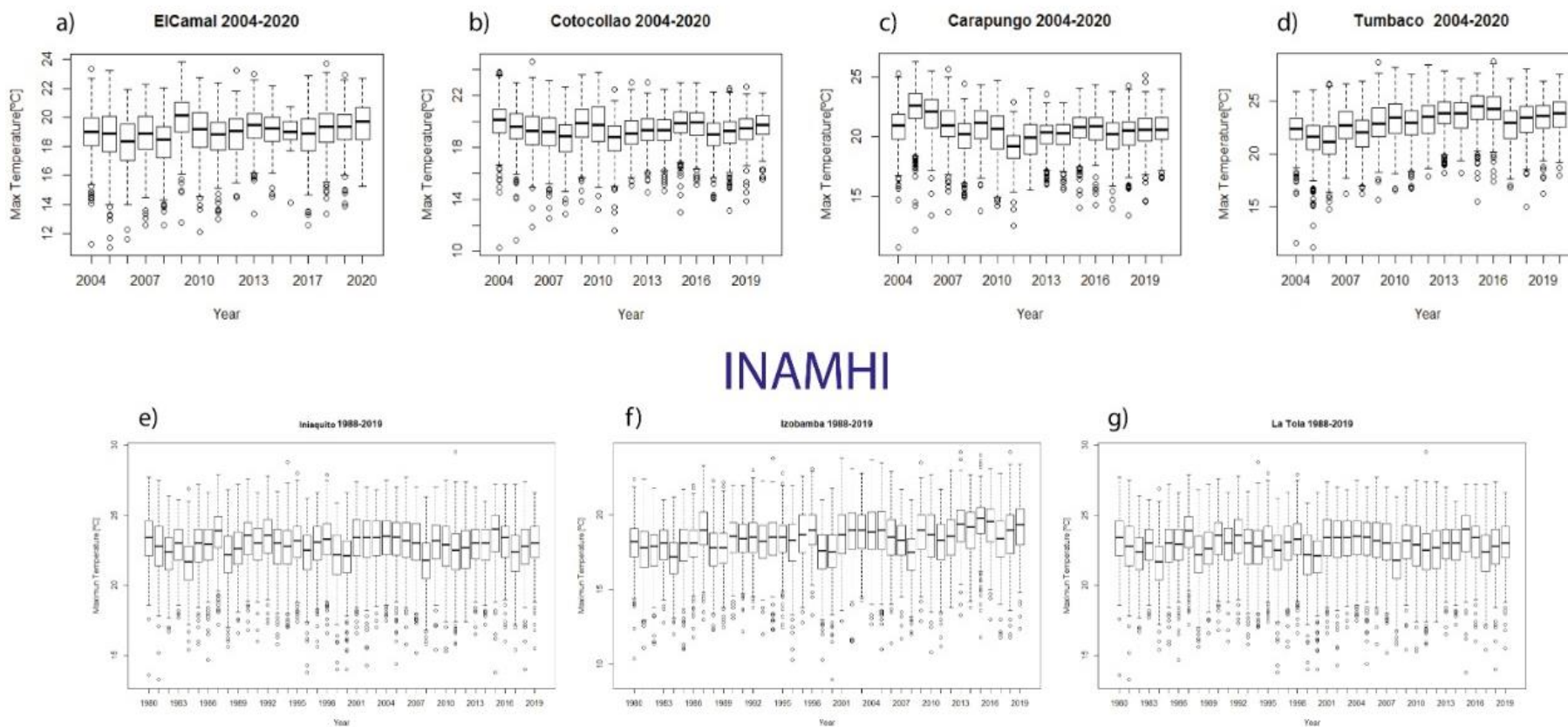
En 2008 se registró una caída de temperatura en todas las estaciones llegando a una media anual de 17 °C en el caso de Izobamba.

“Tanto en 2015 como en 2017 las temperaturas medias mundiales superaron en 1,1 °C las de los niveles preindustriales. Resulta prácticamente imposible establecer una distinción entre ambos años a nivel térmico ya que la diferencia de temperatura es menos de una centésima de grado, lo cual es inferior al margen de error estadístico”

Figura 20.

Representación mediante boxplot de la temperatura máxima anual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola

REMMAQ



Nota: La figura muestra los resultados anuales de temperatura máxima registrada. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

En la Figura 21 se puede tener un concepto más claro de cómo las temperaturas máximas siguen subiendo dejando atrás a temperaturas mínimas de hasta 5°C.

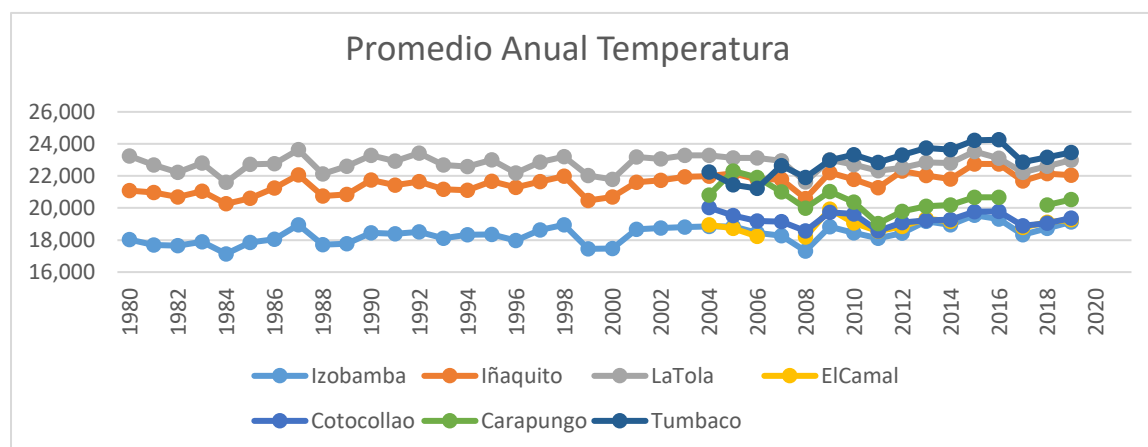
Durante el periodo de sequía provocado por el fenómeno del “El Niño”, se evidenciaron problemas de disponibilidad de agua, incendios forestales y heladas (Arteaga y Burbano, 2017). Estos eventos cambian notablemente la temperatura en todas sus estructuras máximas y mínimas se relacionan con la humedad y precipitación de igual manera.

En la Tabla 1 se puede observar cómo los años mostrados tienen esa variación con respecto a los anteriores o posteriores a este fenómeno climático, se evidencian en el boxplot de la Figura 19 y en la Figura 21, en, Iñaquito, Izobamba y La Tola, en el año 1982 se evidencia un claro aumento en la temperatura máxima y mínima, y en el año 1983 una caída fuerte bajando así de igual manera ambas temperaturas. Con esto se observa una relación directa con los fenómenos del niño y niña en el Distrito Metropolitano de Quito.

En la Figura 21 se evidencia que durante el año 1998 se tuvo un rango histórico de temperaturas elevadas en la variable de temperatura máxima.

Figura 21.

Promedio Anual de Temperatura Máxima

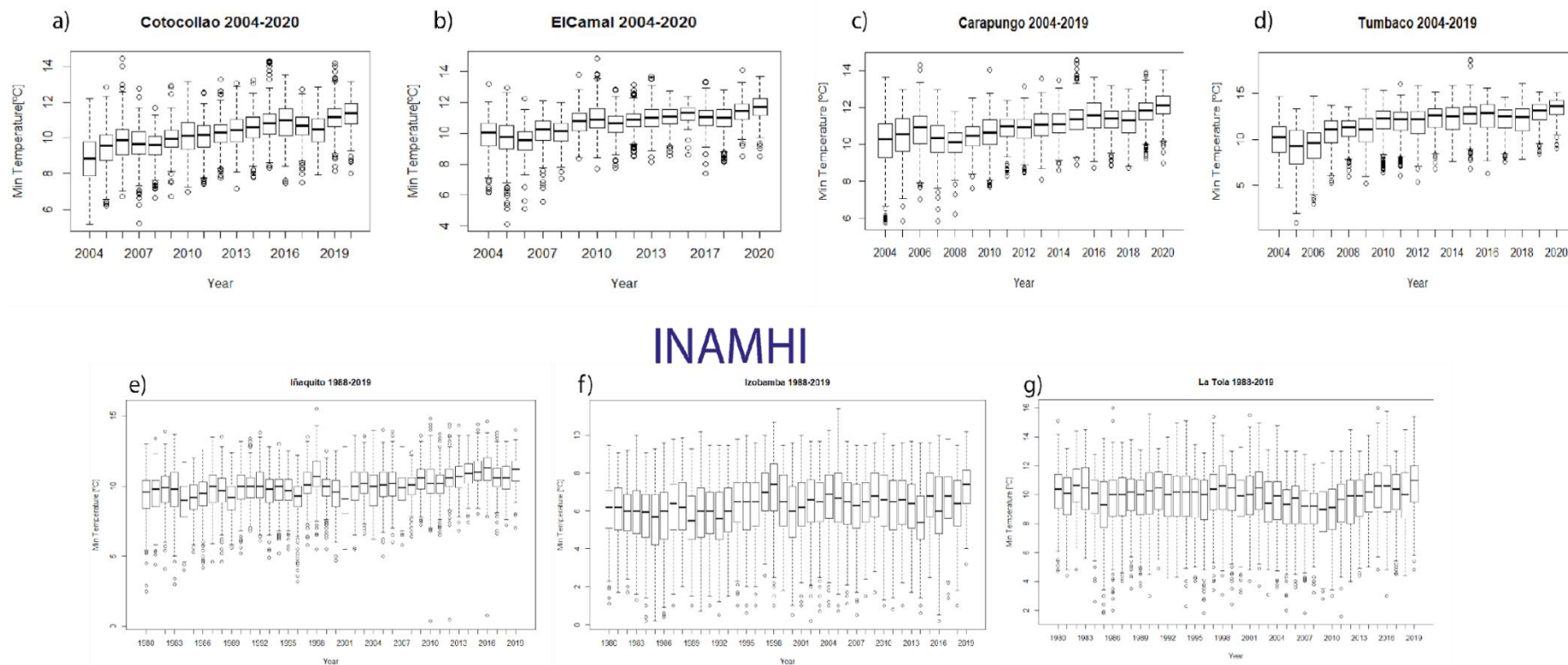


Nota: La figura muestra los resultados anuales de temperatura máxima. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

Figura 22.

Representación mediante boxplot de la temperatura mínima anual en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola

REMMAQ



INAMHI

Nota: La figura muestra los resultados anuales de temperatura mínima registrada. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

5.1.5 Presión

5.1.5.1 Ciclo Diurno De La Presión Barométrica.

Se analizará únicamente los datos proporcionados por la REMMAQ debido a que estas estaciones cuentan con datos horarios, los cuales se muestran en los siguientes boxplots.

En la Figura 22, se muestra la presión como una variable que depende inversamente de la altura a la que se encuentra sobre el nivel del mar la estación estudiada. A lo largo del día se puede observar como la presión va cambiando progresivamente que lo cual es común en la zona tropical.

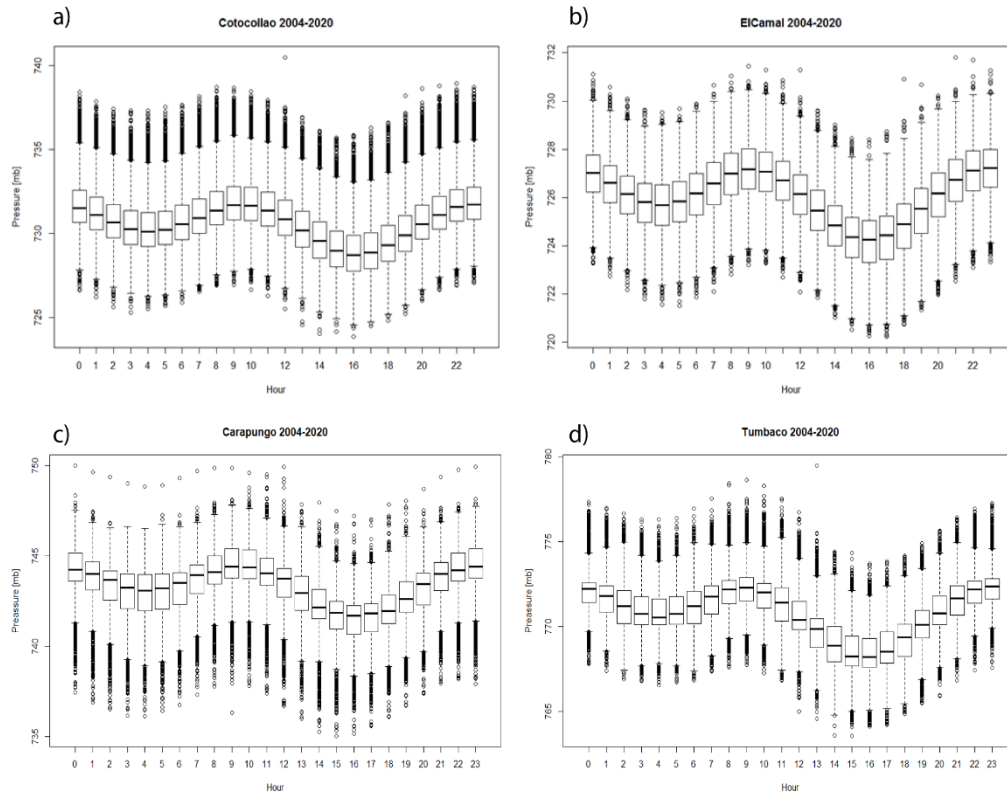
La estación con mayor presión en el ciclo diurno es d) Tumbaco, llega a rangos altos durante las 24 horas, con casi 30 [mb] por encima del resto.

Por ejemplo, se observa en las estaciones de manera general en la data del boxplot que de 1 a.m. a 4 a.m. y comienza un descenso más fuerte de 10:00 a.m. a 15:00 p.m.; va descendiendo en rangos de 732 [mb] a 731 [mb] en el caso de a), En el caso de b) se puede ver que va de 727[mb] a 725 [mb], En el caso de c) va de 744 [mb] a 743 [mb] y finalmente en d) va de 772 [mb] a 771[mb].

En la Figura 23, se observa como la presión barométrica oscila durante todas las horas del día, los puntos más altos de las presiones en las estaciones; a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco 8:00 a.m. y 10:00 a.m., y durante la noche entre 22:00 p.m. y 24:00 p.m., el punto más bajo se halla en horas de la madrugada que van a ir 04:00 a.m. y 05:00 a.m. y en hora de la tarde desde las 15:00 p.m. y 17:00 p.m.

Figura 23.

Representación de la presión barométrica mediante boxplot horario de 0 a 23 horas en las estaciones de. A) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco



Nota: La figura muestra los resultados horarios de presión registrados. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

El aire cálido en altura, responsable de “estirar” las columnas, está asociado con altas presiones, mientras que el frío, también en altura que comprime las columnas hemos de relacionarlo con bajas presiones. Esto no debe llevarnos a engaño, ya que relacionar altas presiones con aire más denso y bajas con más ligero (Viñas, 2020).

5.1.5.2 Ciclo Estacional de la Presión Barométrica.

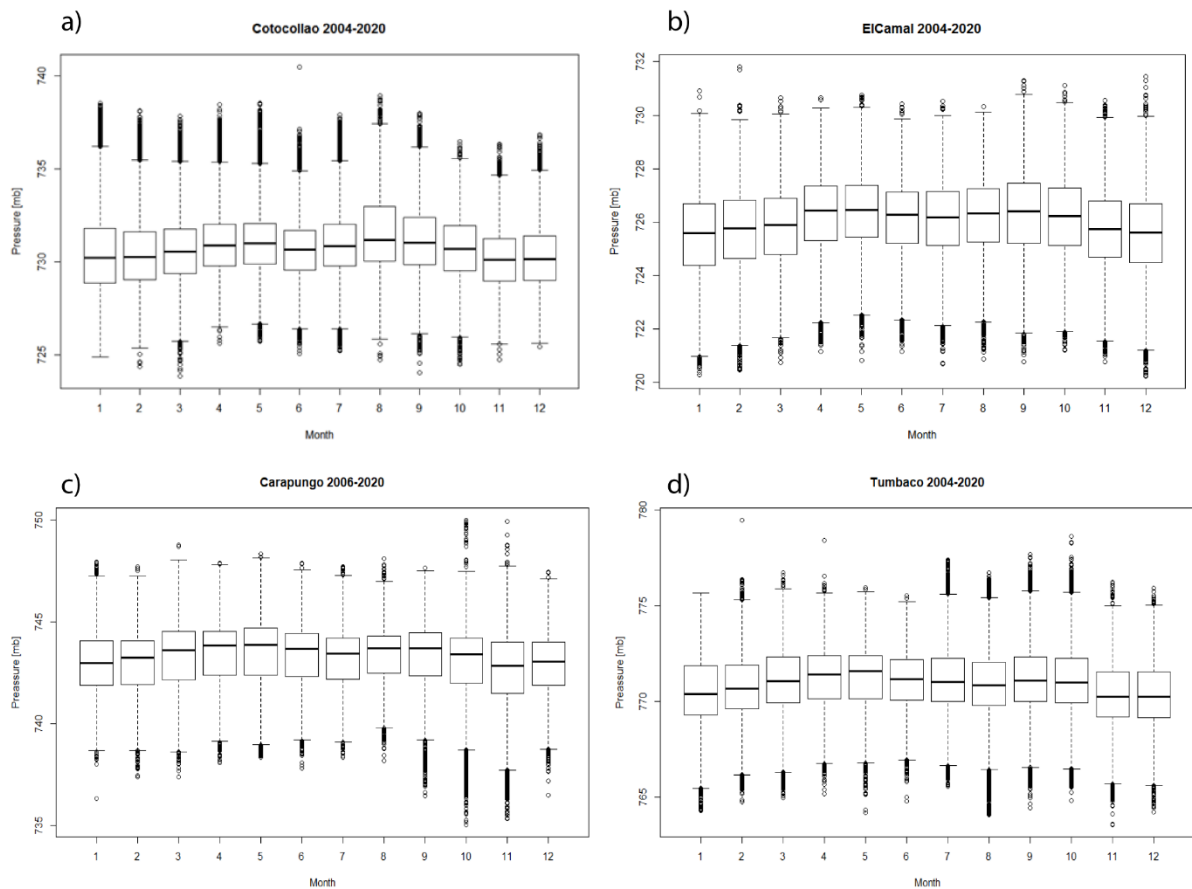
Se observa que durante los meses de mayor radiación se tiene una ligera variación en el ciclo estacional durante los meses de abril, mayo, agosto y septiembre. Estos meses la radiación junto con las mareas regionales tienden a aumentar los [mb].

Este fenómeno ocurre primordialmente por la absorción de la radiación solar por el ozono en la parte alta de la atmósfera, y la absorción del vapor de agua en las partes bajas

de la atmósfera. Esto provoca cambio de densidad en el aire que genera olas termales que se puede medir por las pequeñas variaciones de presión que ocurren en la superficie de la tierra (Ahrens, 2009).

Figura 24.

Representación de la presión barométrica mensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco



Nota: La figura muestra los resultados mensuales de presión registrados. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

Se observa en la Figura 24 claramente que a diferencia de las demás variables la presión, por ser de alta inercia, no varía notablemente durante los doce meses, el máximo

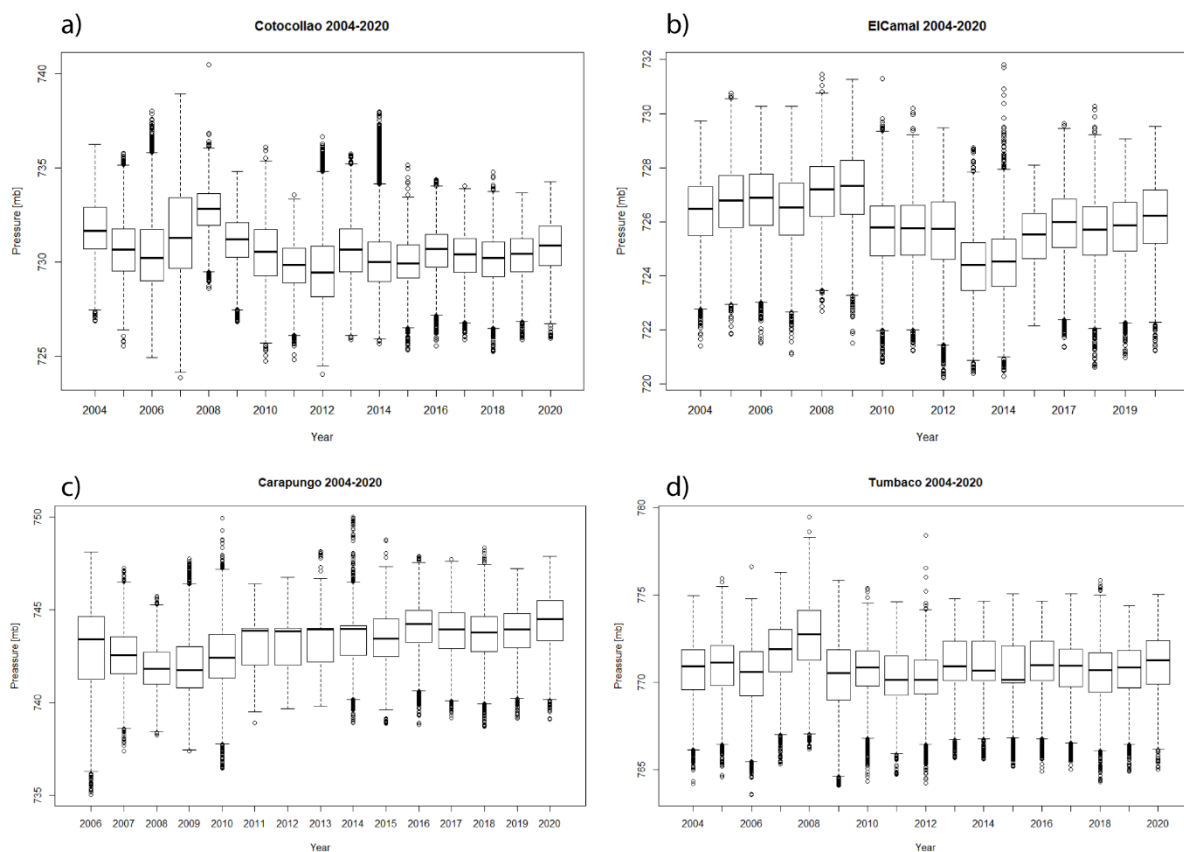
está en la estación d) Tumbaco, con 771 [mb], y la más baja en la estación b) con 775 [mb].

5.1.5.3 Ciclo Anual De La Presión Barométrica.

“Ecuador está ubicado dentro del cinturón de bajas presiones atmosféricas donde se sitúa la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Por esta razón, ciertas áreas del Ecuador reciben la influencia de masas de aire con diferentes características de temperatura y humedad” (Valverde y Cano, 2005).

Figura 25.

Representación mediante boxplot anual de la presión en las estaciones de: a) Cotacollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola



Nota: La figura muestra los resultados anuales de presión registrados. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

En la Figura 25 se puede observar una estrecha relación con los datos mostrados en la Tabla 1, cuyos episodios son a consecuencia del calentamiento del Pacífico ecuatorial en la parte oriental, la presión barométrica muestra anomalías negativas, ya que las altas temperaturas del océano dan como respuesta la pérdida de densidad del aire y por consiguiente el descenso de la presión atmosférica como se observa durante los años 2006 y 2016.

Al contrario, el efecto de las temperaturas bajas en el Pacífico existe un ascenso de la presión como se observa en el año 2008, 2009 y 2011.

Las estaciones a) Cotacollao y c) Carapungo, en la Figura 25, se ubican a escasos kilómetros esto hace que el comportamiento de la presión sea similar llegando a máximos aproximados de 733 [mb] y 744 [mb]. Y mínimas de 729[mb] y 742[mb] respectivamente.

La estación b) El Camal, está ubicada al sur de Quito, las presiones anuales llegan a una media máxima aproximada de 727 [mb] y una mínima de 724 [mb].

Finalmente, en la estación d) Tumbaco, ubicada en los valles de Quito se observan las mayores presiones medias máximas anuales llegando a 773 [mb] y mínimas de 770 [mb].

5.1.6 Humedad Relativa

5.1.6.1 Ciclo Diurno Humedad.

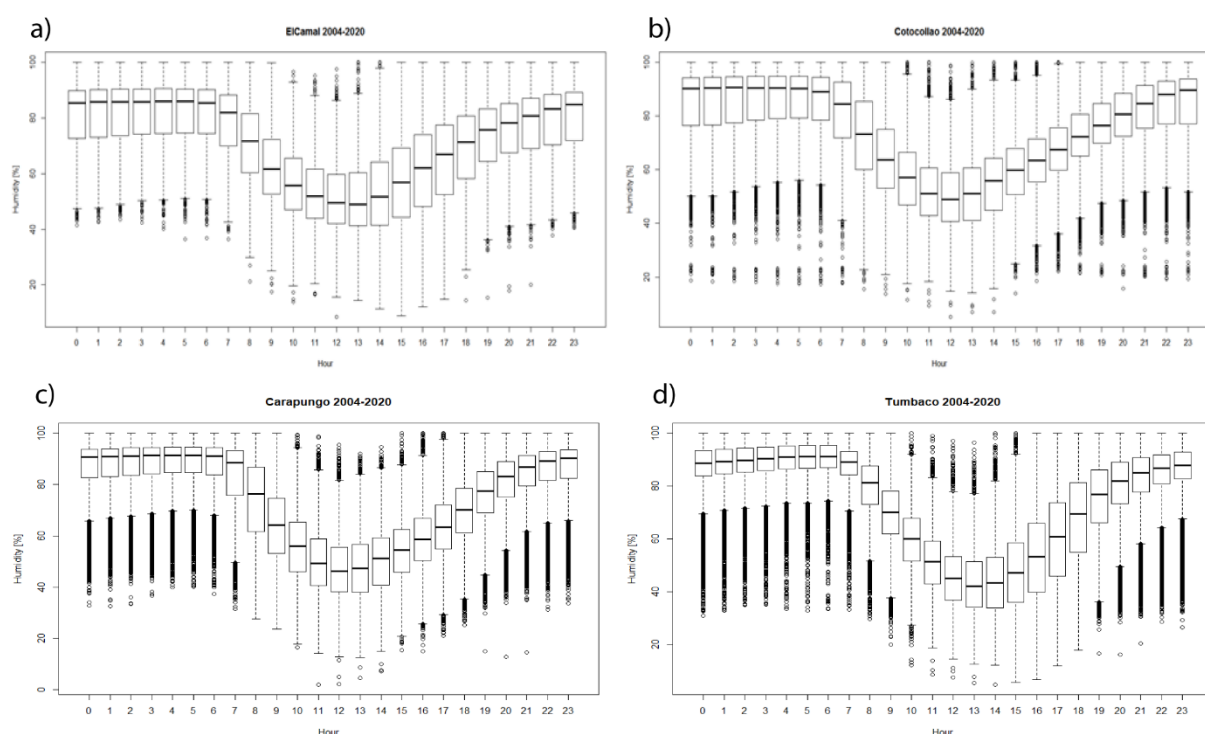
La humedad es una variable meteorológica que tiene una relación muy estrecha con la estabilidad atmosférica y por consiguiente con la ocurrencia y distribución de la precipitación y esto también afecta al ciclo diurno de la humedad.

Puede observarse en la Figura 26, que los valores mínimos de humedad relativa se presentan entre las 10h00 y 14h00 para todas las estaciones.

En las noches y madrugadas, cuando disminuye paulatinamente la temperatura, los valores de humedad relativa alcanzan sus valores más altos registrando 90% en junio, 50[%] en julio y 78 [%] en agosto.

Figura 26.

Representación de la humedad mediante boxplot horario de 0 a 23 horas en las estaciones de. a) Cotacollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco



Nota: La figura muestra los resultados horarios de la humedad registrados. Elaborado por: Santillán K., Zamora E

5.1.6.2 Ciclo Estacional De La Humedad.

La humedad arroja valores máximos acorde a las precipitaciones que se muestran, (Figura 27), ya que en los meses de mayor pluviosidad en Quito son marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre. (Figura 13)

“La humedad relativa tiene un comportamiento inversamente proporcional a la temperatura, es decir, que cuando se incrementa la temperatura, disminuye

proporcionalmente la humedad, dando cumplimiento a la Relación de Clausius Clapeyron” (Romps, 2016).

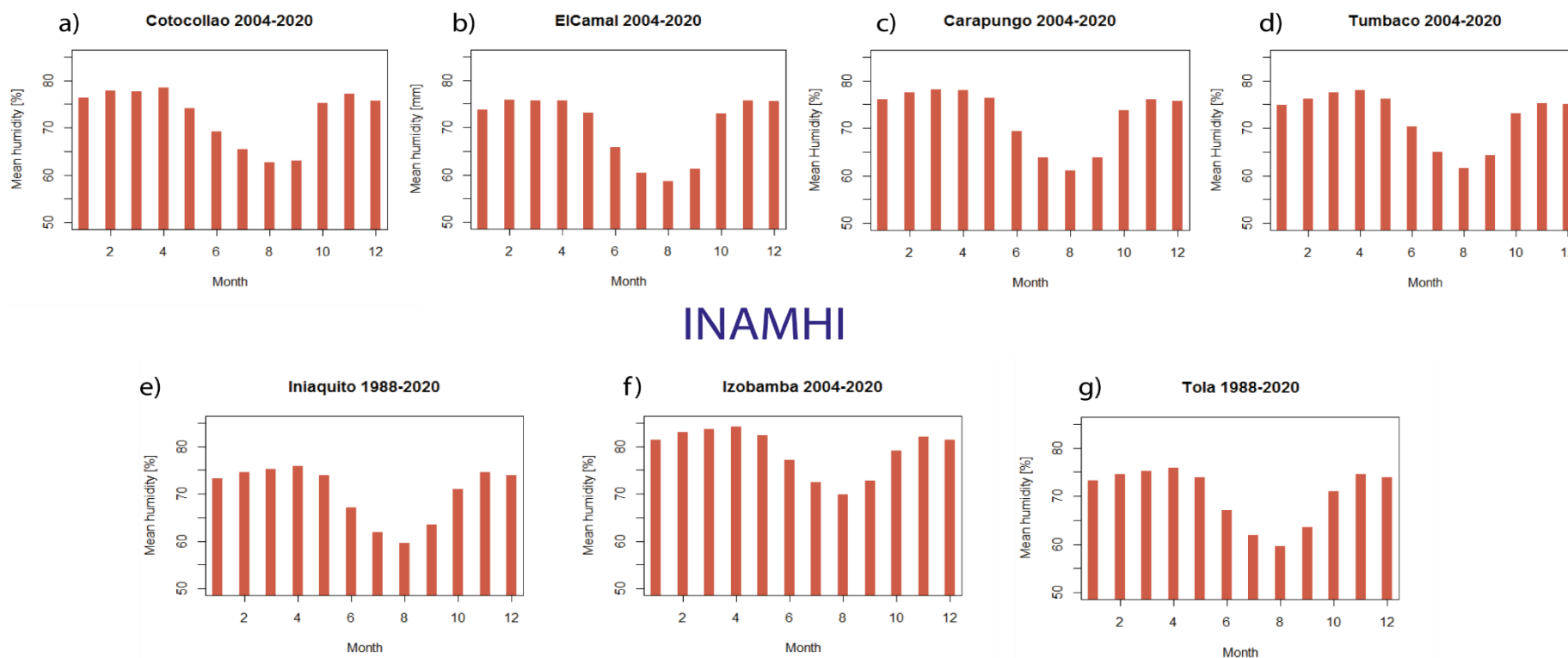
La disminución de la humedad se da en los meses de verano los cuales son: junio-julio-agosto llegando hasta el 59 [%], esta es conocida por ser una seca, en la que se incrementan los vientos y disminuye la nubosidad.

En los meses restantes la humedad oscila de gran manera puesto que son meses de transición y se muestran masas húmedas y periodos secos. Se observa que generalmente la humedad no ha tenido fuertes diferenciaciones en sus valores medios debido al alto contenido que generalmente se presenta en la zona tropical.

Al observar la Figura 27, se puede apreciar que la estación más húmeda es la de Izobamba, con valores que van de 70[%] a 85[%], mientras que la más seca es la de la Tola, ubicada en el oriente de Quito con la que se logra un máximo de 75[%]

Figura 27.

Representación mediante histograma de la humedad mensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Ñaquito, f) Izobamba y g) La Tola



Nota: La figura muestra los resultados mensuales de la humedad registrados. Elaborado por: Santillán K., Zamora E

5.1.6.3 Ciclo Anual De La Humedad.

De acuerdo con Figura 28, se puede verificar que corresponde estrechamente con los datos obtenidos de precipitación (Figura 14), existe un descenso en los años 1992,1997,1998, 2015 y se incrementa ligeramente en el año 1993,2000,2002, 2011 y 2017 estos cambios sin embargo no son bruscos, más bien se mantienen constantes con pequeñas variaciones.

Se observa que históricamente que esta variable no aumenta ni disminuye drásticamente, la humedad relativa media anual en las estaciones estudiadas van del 86% y 73%; las zonas que presentan un mayor índice de humedad son d) Tumbaco al igual que f) Izobamba, la estación con menor humedad registrada es c) Carapungo.

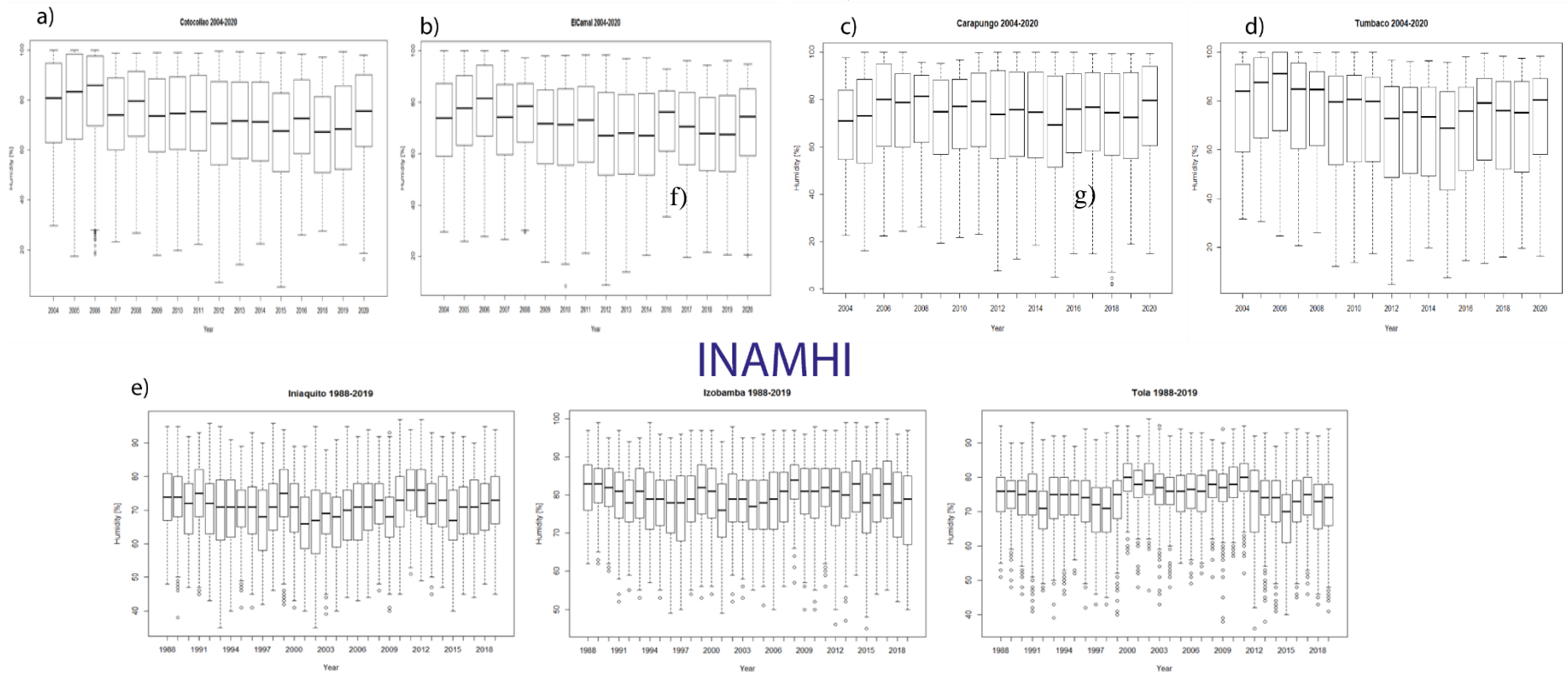
Se puede observar en la Figura 28 que la humedad relativa con respecto a la temperatura máxima (Figura 20), tiene una relación fuertemente proporcional y altamente sensible a sus cambios.

Con respecto a la presión (Figura 25), se observa por ejemplo en el 2012 a medida que la presión disminuye, se denota que el aire se vuelve más seco la humedad relativa disminuye, y si la presión aumenta como en el 2016, el aire se vuelve más húmedo y la humedad relativa se amplía.

Figura 28.

Representación mediante boxplot de la humedad anual en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola

REMMAQ



INAMHI

Nota: La figura muestra los resultados anuales de la humedad registrados. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

5.1.7 Vientos

5.1.7.1 Velocidad del Viento.

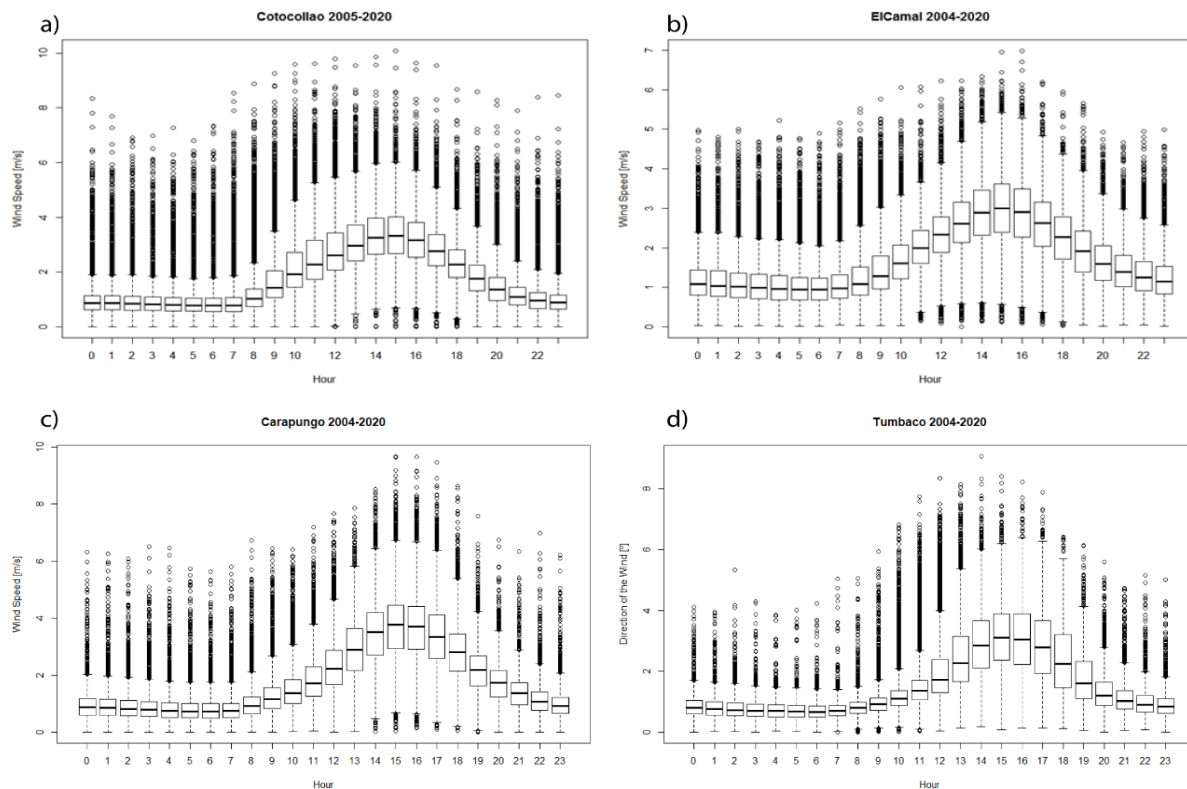
5.1.7.1.1 Ciclo Diurno De La Velocidad Del Viento.

De acuerdo a Zuñiga y Crespo (2010), “el movimiento del viento depende de las fuerzas generadas por el gradiente de presión atmosférico, causado por una diferencia de temperatura” (p.122).

En la Figura 29, se aprecia cómo se incrementa la velocidad del viento debido al forzamiento radiactivo solar, es entonces el sol responsable de la aparición de vientos, los cuales, en el DMQ, llegan a su máximo valor alrededor de las 3pm, aquí se logra velocidades de entre 2 m/s y 7 m/s. En horas de la mañana las 4 estaciones (Cotocollao, El Camal, Carapungo y Tumbaco) hasta las 11h00, alcanzan velocidades de entre 1 m/s y 2m/s.

Figura 29.

Representación mediante boxplot horario de la velocidad del viento de 0 a 23 horas en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola



Nota: La figura muestra los resultados horarios de la velocidad del viento registrados. Elaborado por: Santillán K., Zamora E

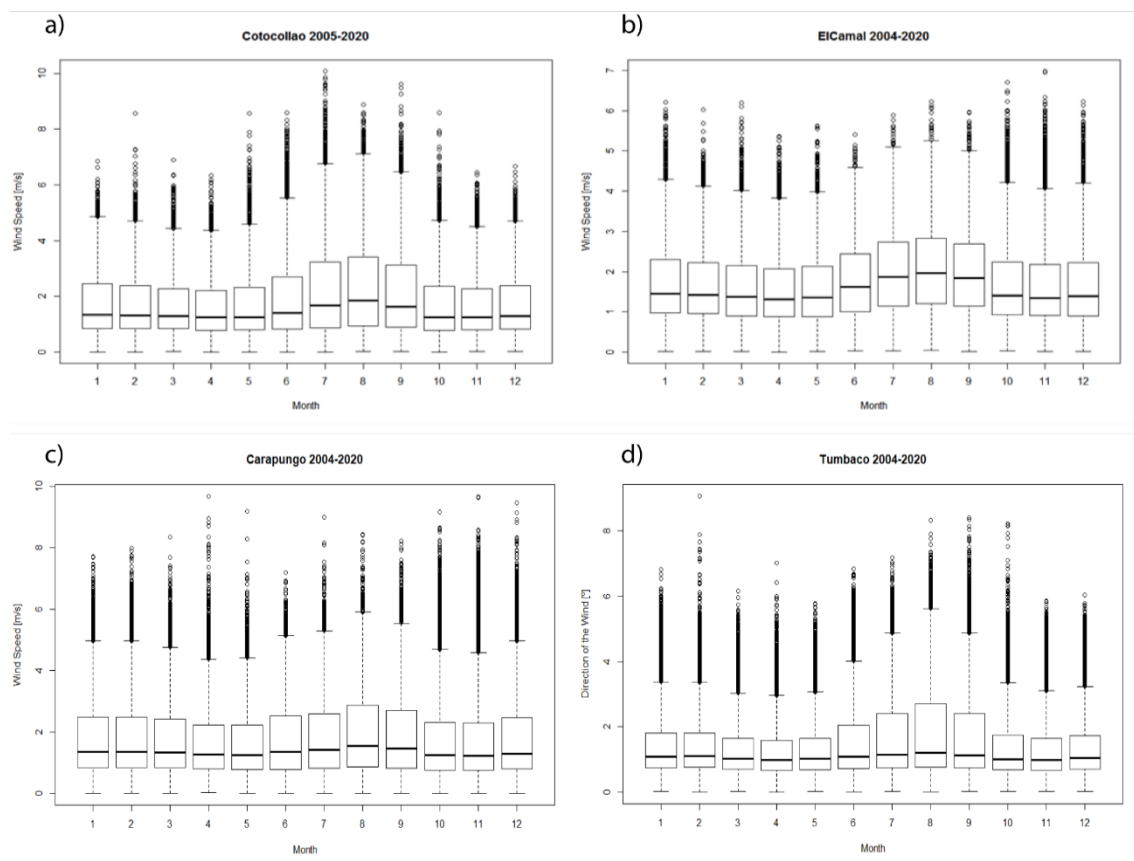
5.1.7.1.2 Análisis Estacional De La Velocidad Del Viento.

En la Figura 30, se puede observar como la velocidad del viento aumenta durante los meses de verano desde junio hasta septiembre cuyo pico de los promedios diarios llegan entre 1,5 y 1,3 m/s para todas las estaciones.

En los meses de enero a marzo y de octubre a diciembre específicamente, la velocidad promedio del viento disminuye, en abril existe un ligero descenso diferente al de estos meses. La mayor velocidad mensual promedio la muestra la estación a) Cotocollao con 1,779 m/s y la menor velocidad mensual promedio es la estación d) Tumbaco, con 1,486 m/s.

Figura 30.

Representación mediante histograma de la velocidad del viento intermensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones de. a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola

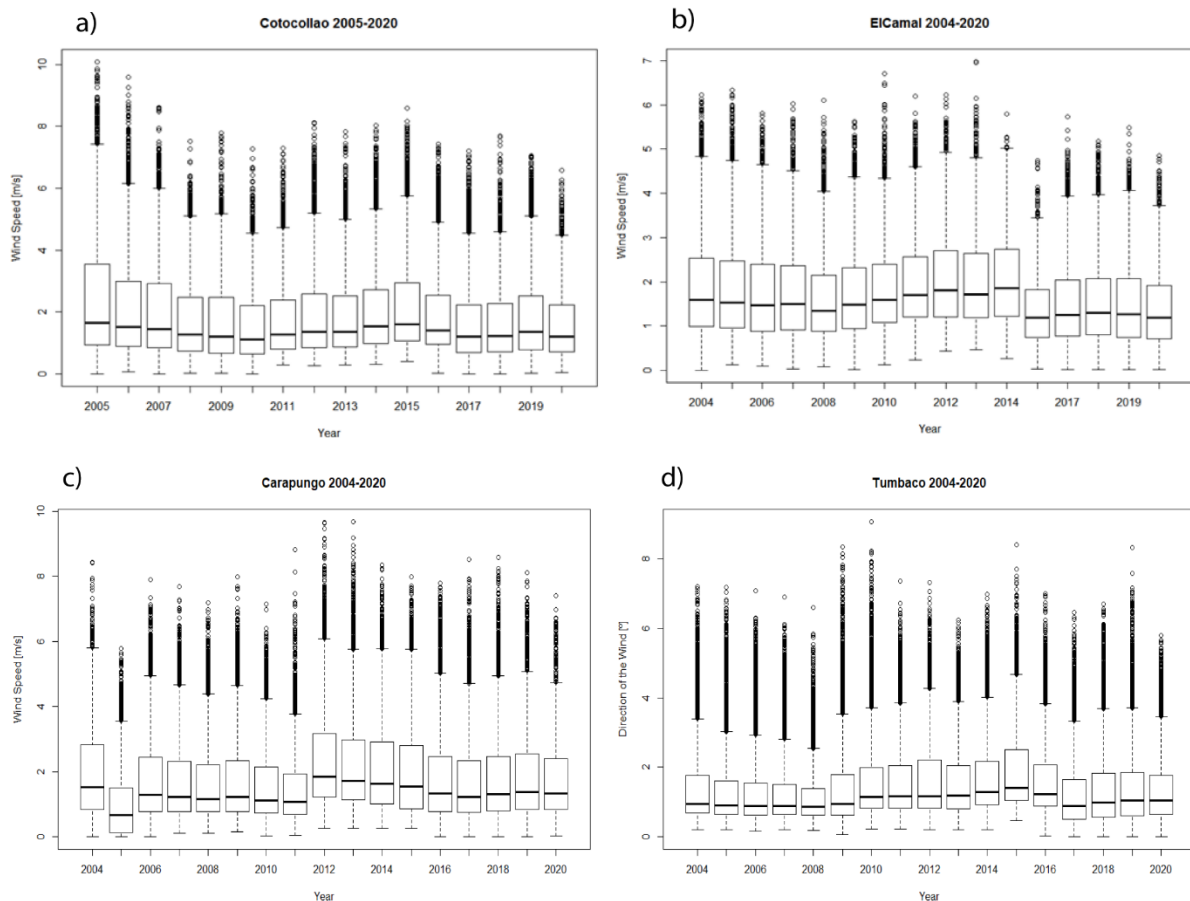


Nota: La figura muestra los resultados mensuales de la velocidad del viento registrados. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

5.1.7.1.3 Análisis Anual De La Velocidad Del Viento.

Figura 31.

Representación mediante boxplot anual de las estaciones: a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, e) Iñaquito, f) Izobamba y g) La Tola



Nota: La figura muestra los resultados anuales de la velocidad del viento registrados. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

Como se puede visualizar en la Figura 31, los años más ventosos para a) Cotocollao se encuentran en el 2005 y 2015 con 1,8 y 1,7 m/s respectivamente y hasta el 2020 no se ha podido obtener valores similares, ya que estos han ido disminuyendo. Para b) en El Camal el año con vientos más predominantes fue 2005, 2010 y 2013 de ente 1,6 y 1,7 m/s. En c) Carapungo en los años 2012 y 2013 registra vientos de hasta 1,7 m/s aproximadamente, se tiene una caída muy baja registrada en 2005 con 0,9 m/s mientras que en d) Tumbaco los años 2009 y 2010 presentan vientos predominantes de 1,5 m/s.

En cuanto a los años menos ventosos para la Figura 30 en a) se registra el año 2005 para b) El Camal con máximas de hasta 1,5 m/s, en b) existe una media de 1,6 a 1,8 m/s, sin una variación considerable para Cotocollao. En c) en Carapungo el año 2005 se

registra como el año con menos viento con un valor de 1,6 m/s. Y finalmente para d) Tumbaco, igualmente existe una media de entre 1,6 y 1,8 m/s.

5.1.7.2 Dirección Del Viento.

5.1.7.2.1 Ciclo Diurno de la Dirección del Viento.

Ecuador está bajo la influencia de los vientos alisios, los que soplan del noreste en el hemisferio norte y del sur este en el hemisferio sur (IDEAM, 2005)

Las veletas usadas tanto por la REMMAQ como por el INAMHI han arrojado datos del DMQ para registrar de dónde vienen los vientos hacia la capital. Para registrar estos valores necesitamos la ayuda de la velocidad para ilustrar la rosa de los vientos.

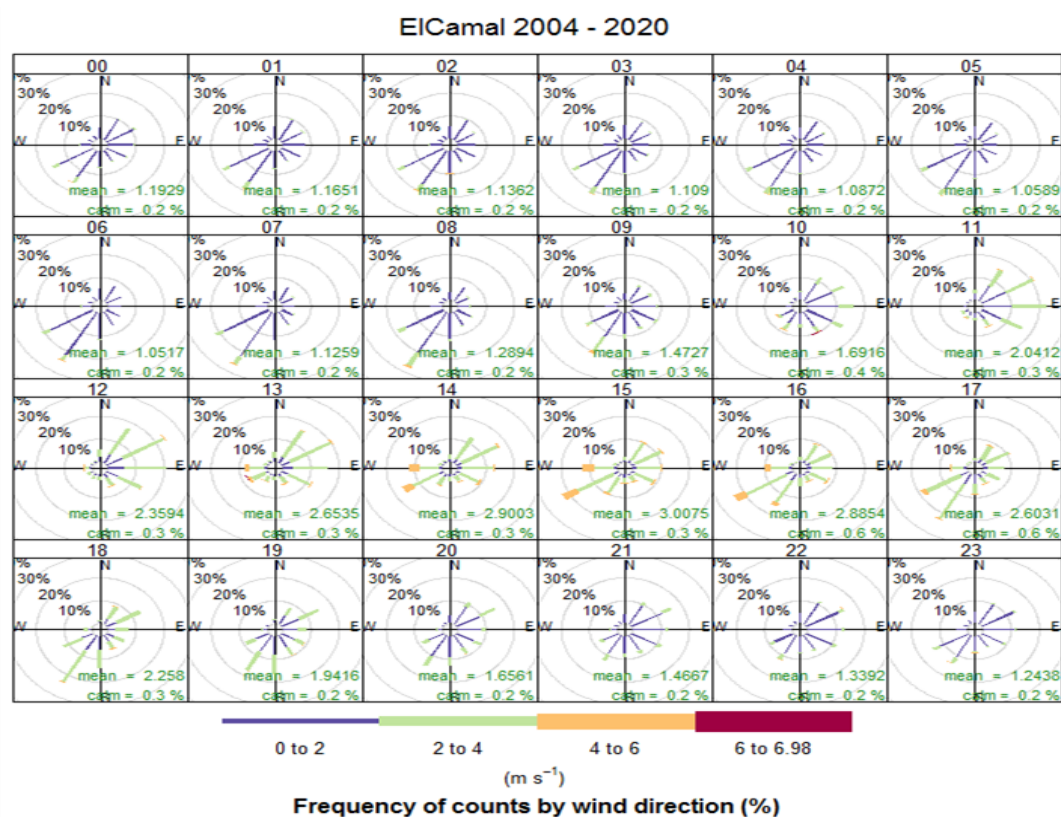
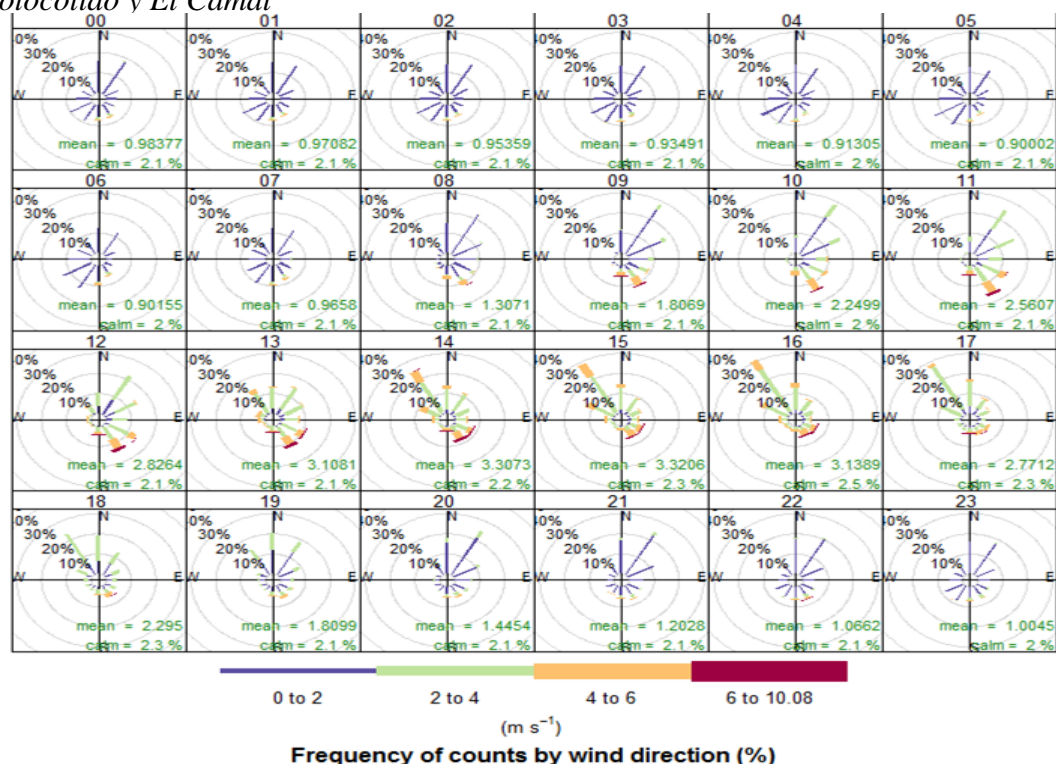
En las Figuras 32 y 33 se puede observar que de manera general desde las 10h00 se empiezan a definir las direcciones de los vientos, esto ocurre hasta las 22h00 p.m. Se puede determinar un patrón con mayor tendencia al Sur(S) y Sureste (SE), a partir de las 5 a.m. se observa que la dirección va variando desde el S y llega a las 11h00, hasta el SE, se mantiene constante desde las 10:00 hasta las 19h00 en el SE y vuelve a subir al S.

Según la Figura 31, En la estación de Cotocollao existe una variación desde las 14h00 y hasta las 17h00 un cambio de dirección hacia el Noroeste (NW), en la estación de El Camal, existe más calma en los vientos se mantienen en un 20% al Suroeste (SW) de 14:00 a 20:00 en promedio.

En la Figura 33, En la estación de Tumbaco se muestra una tendencia de los vientos viniendo del NW, desde las 12h00 hasta las 22h00, en cambio en Carapungo los vientos vienen marcando claramente el Norte de 13h00 a 17h00.

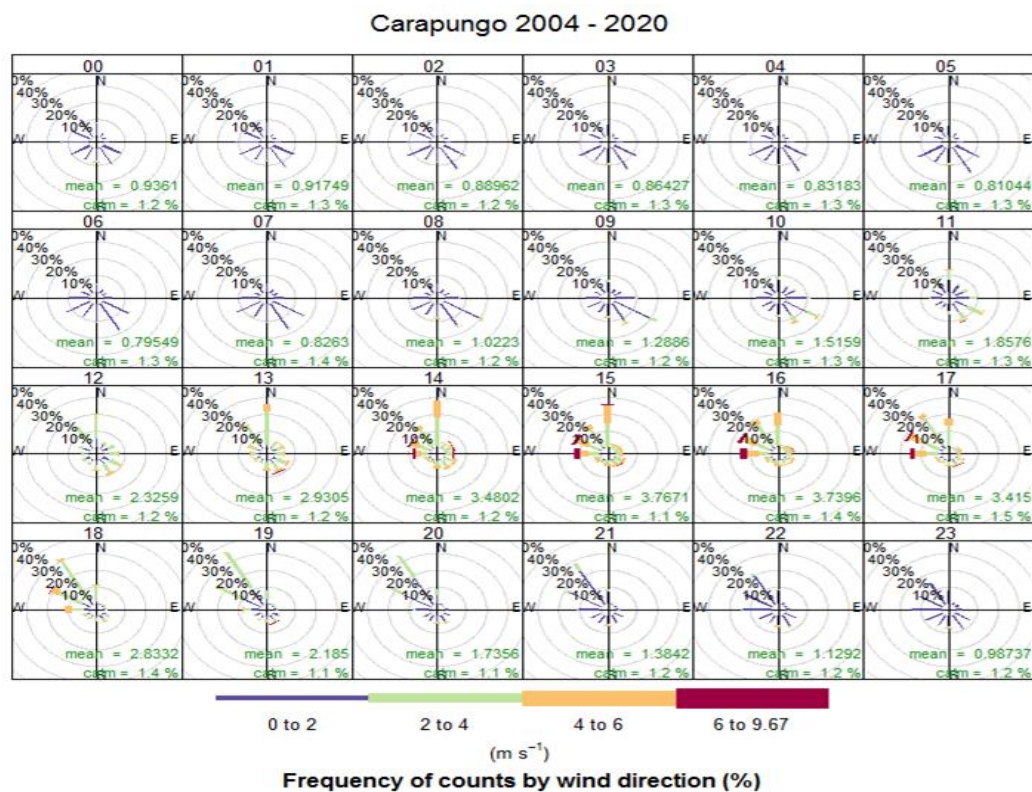
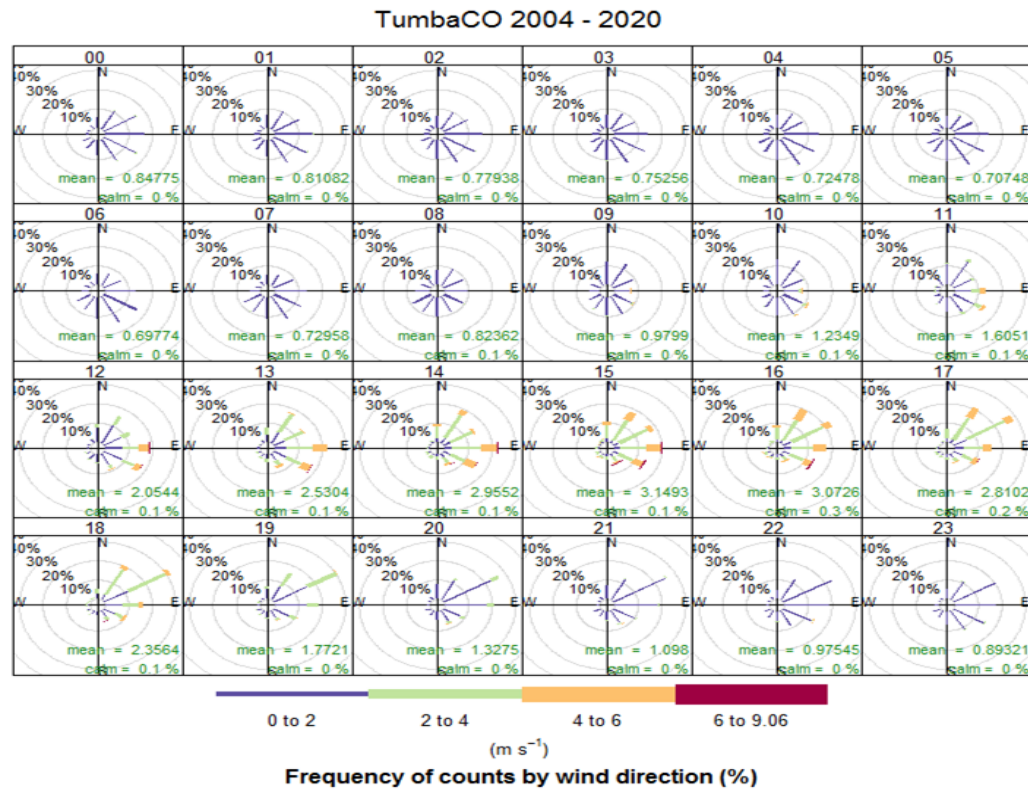
Figura 32.

Representación mediante rosa de los vientos horaria de 0 a 23 horas de las estaciones: Cotocollao y El Camal



Nota: La figura muestra los resultados horarios obtenidos de la rosa de los vientos Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

Figura 33. Representación mediante rosa de los vientos horaria de 0 a 23 horas de las estaciones: Tumbaco y Carapungo

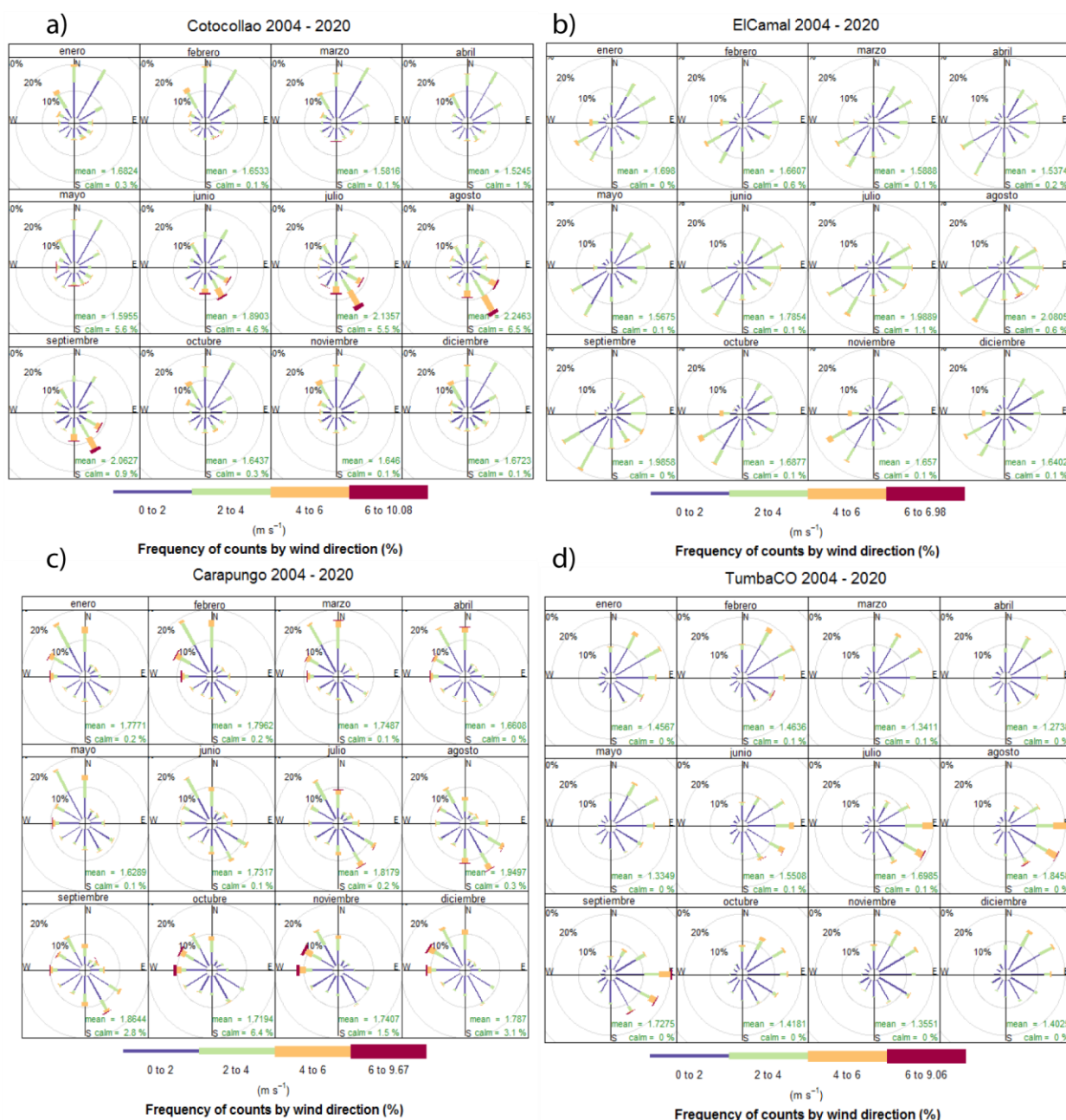


Nota: La figura muestra los resultados horarios obtenidos de la rosa de los vientos. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

5.1.7.2.2 Ciclo Mensual De La Dirección Del Viento.

Figura 34.

Representación mediante rosa de los vientos mensual durante el periodo de enero a diciembre en las estaciones; Cotocollao, El Camal, Carapungo y Tumbaco



Nota: La figura muestra los resultados mensuales obtenidos de la rosa de los vientos. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

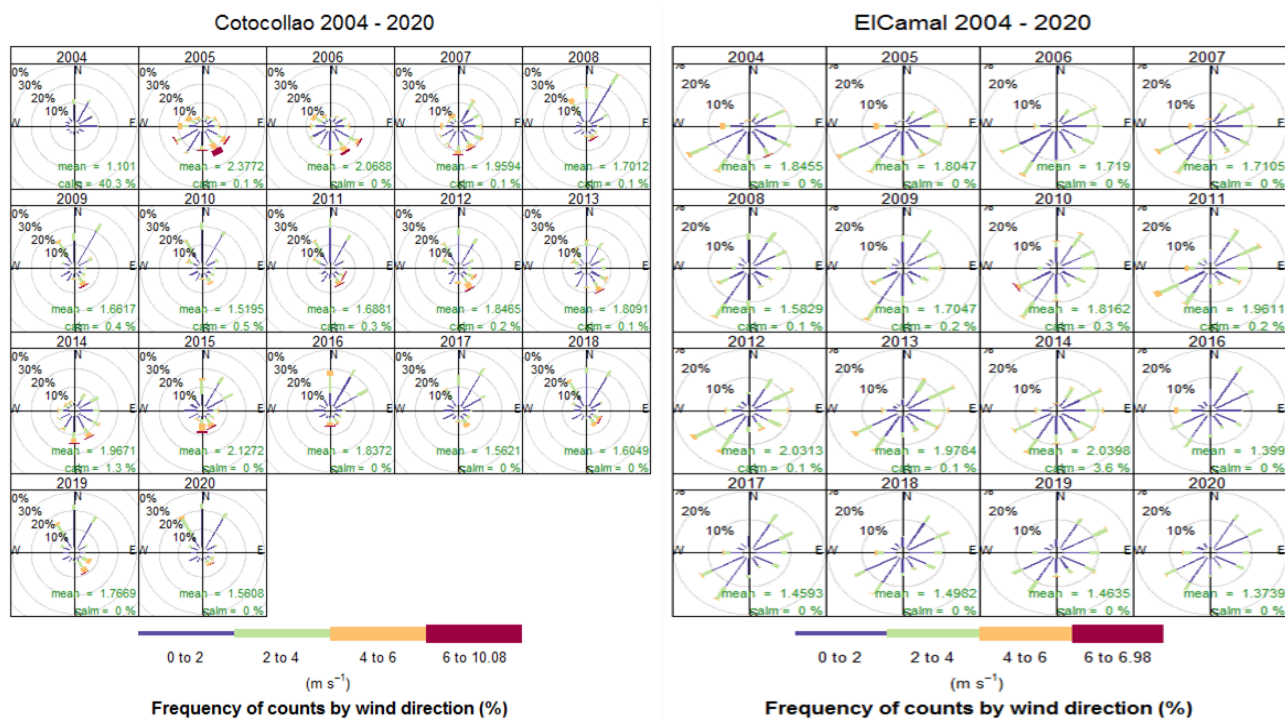
En la Figura 34 se denota que, en términos generales en las estaciones a) Cotocollao, b) El Camal, c) Carapungo, d) Tumbaco, durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre la dirección del viento está más claramente marcada, ya que aumenta la velocidad y con ello se puede tener mejor definido el origen de donde viene, por ejemplo, en las estaciones a) Cotocollao y c) Carapungo, durante estos meses la dirección dominante es SE. En las estaciones de b) El Camal durante este ciclo de verano la dirección del viento se denota en SW y en el valle de Quito en la estación d) se muestra que la dirección predominante es SE. Con esto se denota que, dentro de la ciudad en estos meses, los vientos circulan en varias direcciones.

En a) Cotocollao, se registra la dirección con mayor velocidad con una media de 1.7785 y una calma de 2.1%. de 0.2%. En c) Tumbaco, se registra la dirección con la menor velocidad con una media de 1.4857 y una calma de 0.1%.

5.1.7.2.3 Ciclo Anual De La Dirección Del Viento.

Figura 35.

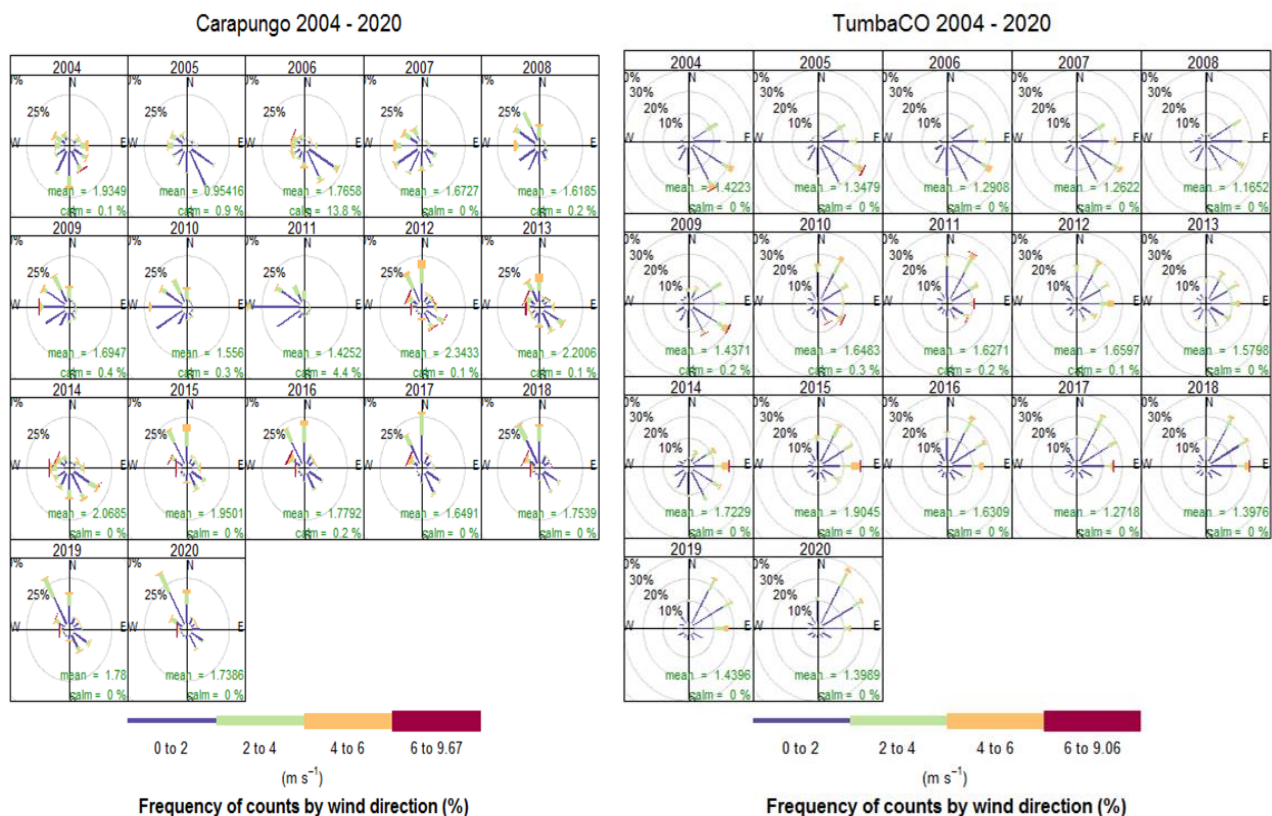
Representación mediante rosa de los vientos anual de las estaciones. a) Cotocollao y b) El Camal



Nota: La figura muestra los resultados anuales obtenidos de la rosa de los vientos Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

Figura 36.

Representación mediante rosa de los vientos anual de las estaciones; Carapungo y Tumbaco



Nota: La figura muestra los resultados anuales obtenidos de la rosa de los vientos. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

En las Figuras 36 se observa cambios ligeros en la dirección del viento, además de cambios en la temperatura que tuvieron relación en la trayectoria del viento.

Se observa la gran dispersión en cuanto a la dirección por estación y anualmente sin tendencias claras, esto se debe al rozamiento por el follaje y las construcciones en el DMQ, así en 2010 y 2016 en la estación de Carapungo existen cambios en la dirección del viento con respecto a los demás años.

En Cotocollao durante el 2005, 2012 y 2015 se obtuvo en la rosa de los vientos menor calma y mayor porcentaje de velocidades en su mayoría los vientos anuales son desde el SE.

En El Camal la dirección del viento anual ha sido en porcentaje mayor en SW, desde el 2008 y hasta el 2020 se mostraron resultados que van también de SE y NE.

En Carapungo no se visualiza una tendencia marcada de 2008 al 2013 se tiene una preferencia en SW, pero en esta estación se mueven en los 4 cuadrantes, por ejemplo, en 2005 fue en SE la tendencia. En Tumbaco, se visualizan registros anuales con tendencias claras en SE y NE.

5.2 Resultados Cambio Climático

5.2.1 Tablas De Análisis De Cambio Climático Con RClimdex

Para el análisis de cambio climático se utilizó como punto de partida las estaciones meteorológicas correspondientes al INAMHI, las cuales poseen una base histórica de datos mayor a 40 años. En esta parte del estudio fue necesario la aplicación de RClimdex para su respectivo análisis, basado en 27 índices de cambio climático.

5.2.3 Tablas Con Datos Obtenidos De RClimdex.

En las siguientes tablas se muestra el resumen de los valores obtenidos en RClimdex para el comportamiento de las estaciones de Iñaquito, Izobamba y La Tola. Siendo denominados como correlación (R^2) o también R cuadrado, pendiente (Slope estimate) y significancia estadística (p-value). Para el p-value, se pudo determinar cómo los valores más significativos aquellos que junto a su valor posean dos asteriscos, es decir **, es decir aquellos valores en los que $p \leq 0.01$, mientras que las pendientes cuyo valor $p < 0.1$ estarán representadas por un asterisco *.

5.2.3.1 Evaluación De Criterios Con RClimdex Para Iñaquito.

En los resultados de RClimdex para Iñaquito, en la Tabla 16, se pueden observar los valores más significativos, en los que $p=0$ (100% de confianza) con ***, $p<0.01$ (99% de confianza) con ** y $p<0.1$ (90 de confianza) con *. Así como también pendientes positivas con color rojo, pendientes negativas con color azul y aquellos valores de 0 y NAN con color negro, para una mejor visualización y entendimiento de los mismos.

Tabla 16.

Resultados RClimdex para la estación Iñaquito

IÑAQUITO					
CRITERIO	INDICADOR	UNIDAD	CORRELACION	PENDIENTE	SIGNIFICANCIA ESTADISTICA
			R2	SLOPE ESTIMATE	P-VALUE
TEMPERATURA MÍNIMA	TN10p	Días	0,507	-0,961	0***
	TN90p	Días	0,478	0,77	0***
	TNn	° C	0,71	0,115	0***
	TNx	° C	0,299	0,038	0***
	CSDI	Días	0,206	-0,65	0,004**
	FD0	Días	NaN	0	NaN
TEMPERATURA MÁXIMA	TX10p	Días	0,277	-0,399	0,001**
	TX90p	Días	0,523	0,643	0***
	TXx	°C	0,409	0,06	0***
	TXn	°C	0,013	0,011	0,496
	WGSDI	Días	0,115	0,065	0,037*
	SU25	Días	0,428	0,466	0***
	DTR	°C	0,073	-0,01	0,1*
PRECIPITACIÓN	RX1day	mm	0,002	0,038	0,792
	RX5day	mm	0,311	0,772	0***
	SDII	mm/día	0,254	0,035	0,001**
	R10	Días	0,04	0,146	0,22
	R20	Días	0,079	0,088	0,084*
	CDD	Días	0,009	0,118	0,562
	CWD	Días	0,001	0,009	0,875
	R95p	mm	0,108	2,305	0,041*
	R99p	mm	0,003	0,226	0,756
	PRCPTOT	mm	0,012	1,884	0,51

Nota: La tabla muestra los resultados obtenidos de los índices en Iñaquito. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

5.2.3.2 Evaluación De Criterios Con RClimdex Para Izobamba.

En los resultados de RClimdex para Iñaquito, en la Tabla 17, se pueden observar los valores más significativos, en los que $p=0$ (100% de confianza) con ***, $p<0.01$

(99% de confianza) con ** y $p < 0.1$ (90 de confianza) con *. Así como también pendientes positivas con color rojo, pendientes negativas con color azul y aquellos valores de 0 y NAN con color negro, para una mejor visualización y entendimiento de los mismos.

Tabla 17.

Resultados RCLimindex para la estación de Izobamba

IZOBAMBA					
CRITERIO	INDICADOR	UNIDAD	CORRELACION	PENDIENTE	SIGNIFICANCIA ESTADISTICA
			R2	SLOPE ESTIMATE	P-VALUE
TEMPERATURA MÍNIMA	TN10p	Días	0,474	-0,392	0***
	TN90p	Días	0,44	0,594	0***
	TNn	° C	0,123	0,021	0,012*
	TNx	° C	0,266	0,021	0***
	CSDI	Días	0,106	-0,067	0,02*
	FD0	Días	0,023	-0,009	0,292
TEMPERATURA MÁXIMA	TX10p	Días	0,071	-0,149	0,059*
	TX90p	Días	0,249	0,36	0***
	TXx	° C	0,133	0,018	0,008**
	TXn	° C	0,008	0,006	0,524
	WGSDI	Días	0,002	0,011	0,819
	SU25	Días	NaN	0	NaN
	DTR	° C	0,055	-0,008	0,098*
PRECIPITACIÓN	RX1day	mm	0,028	-0,176	0,389
	RX5day	mm	0,181	0,729	0,021*
	SDII	mm/día	0,205	0,036	0,009**
	R10	Días	0,051	0,207	0,214
	R20	Días	0,051	0,088	0,213
	CDD	Días	0,02	0,201	0,442
	CWD	Días	0,018	0,058	0,459
	R95p	mm	0,112	2,457	0,062*
	R99p	mm	0,008	0,45	0,617
	PRCPTOT	mm	0,049	4,926	0,223

Nota: La tabla muestra los resultados obtenidos de los índices en Izobamba. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

5.2.3.3 Evaluación De Criterios Con RCLimindex Para La Tola.

En los resultados de RCLimindex para Iñaquito, en la Tabla 18, se pueden observar los valores más significativos, en los que $p = 0$ (100% de confianza) con ***, $p < 0.01$ (99% de confianza) con ** y $p < 0.1$ (90 de confianza) con *. Así como también pendientes positivas con color rojo, pendientes negativas con color azul y aquellos valores de 0 y NAN con color negro, para una mejor visualización y entendimiento de los mismos.

Tabla 18.

Resultados RClimdex para la estación La Tola

LA TOLA					
CRITERIO	INDICADOR	UNIDAD	CORRELACION	PENDIENTE	SIGNIFICANCIA ESTADISTICA
			R2	SLOPE ESTIMATE	P-VALUE
TEMPERATURA MÍNIMA	TN10p	Días	0,02	0,074	0,402
	TN90p	Días	0,002	-0,036	0,79
	TNn	° C	0,007	0,008	0,613
	TNx	° C	0	-0,001	0,941
	CSDI	Días	0,042	-0,053	0,225
	FD0	Días	NaN	0	NaN
TEMPERATURA MÁXIMA	TX10p	Días	0	0,007	0,932
	TX90p	Días	0,003	-0,029	0,755
	TXx	° C	0	0,001	0,907
	TXn	° C	0,015	-0,014	0,473
	WGSDI	Días	0,089	0,069	0,033*
	SU25	Días	0,009	-0,141	0,581
	DTR	° C	0	0	0,976
PRECIPITACIÓN	RX1day	mm	0,022	-0,174	0,392
	RX5day	mm	0,025	0,317	0,36
	SDII	mm/día	0,003	0,004	0,746
	R10	Días	0,011	-0,062	0,534
	R20	Días	0,027	0,044	0,329
	CDD	Días	0,099	0,383	0,057*
	CWD	Días	0,007	0,022	0,619
	R95p	mm	0,008	0,538	0,611
	R99p	mm	0,007	-0,281	0,629
	PRCPTOT	mm	0	-0,199	0,936

Nota: La tabla muestra los resultados obtenidos de los índices en la Tola. Elaborado por: Santillán K., Zamora E.

5.3 Resultados RClimdex

Para el presente estudios se utilizó el software RClimdex, con la finalidad de analizar los índices de cambio climático recomendados por el IPCC, en los que se describe por medio de gráficas cada uno de sus análisis y su respectiva descripción. Para lo cual fue necesario la utilización de tres estaciones meteorológicas de estudio más antiguas en el DMQ, con un mínimo de 40 años. Récord de años que es estrictamente necesario para análisis de Cambio Climático.

En cada una de las gráficas se puede observar los siguientes elementos:

- Línea unida por pequeños círculos: pertenece al índice anual de cada variable
- Línea punteada: ajuste de tendencia lineal y ponderada (media móvil)
- Línea recta y continua: ajuste de tendencia por mínimos cuadrados
- Eje de las abscisas: años en los que fueron tomados los datos
- Eje de las ordenadas: índice analizado
- Cada gráfica presenta información de R² (en porcentaje), la pendiente (slope) de la recta ajustada con mínimos cuadrados y de la significancia estadística de la pendiente p-value.

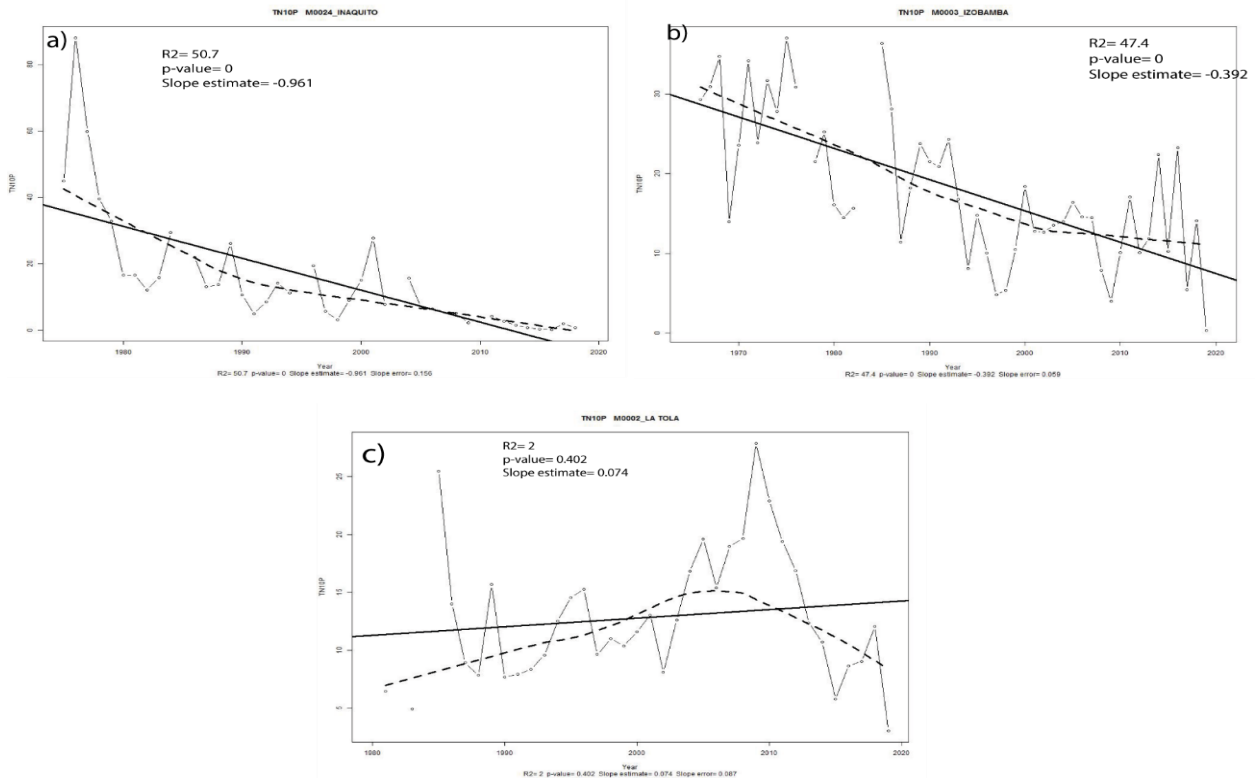
5.3.1 *Temperatura Mínima*

De acuerdo al IPCC, la temperatura mínima es aquella que se registra en horas de la noche, las cuales se describen a continuación.

5.3.1.1 Días En Los Que La Temperatura Mínima Es Menor Al Percentil 10 (TN10p).

Figura 37.

Resultado gráfico de porcentaje de días cuando $TN < 10p$ de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La figura muestra la frecuencia de noches frías. Elaborado por: Santillán K., Zamora

El siguiente índice nos indica qué tan frecuentes son las noches frías (o madrugadas más específicamente). Para la Figura 37 (a, b y c), en TN10p o también denominado frecuencia de noches frías, se puede observar que en la estación de Iñaquito a), existe una considerable disminución, pues posee una significancia estadística (p-value) de 0, lo que quiere decir que es altamente significativa y una pendiente negativa (slope estimate) de -0.961% noches/ año que lo demuestra. Esta disminución se ve marcada desde antes del año 1975, que superan el 85%noches/año y a partir de 1980 hasta el 2019, estas bajan alrededor del 0.79%noches/año. En cuanto a Izobamba b), con un p-value de 0, se puede

observar que de la misma manera disminuye en promedio desde 1968 de 34.73%noches/año a 0.363%noches/año en el 2019.

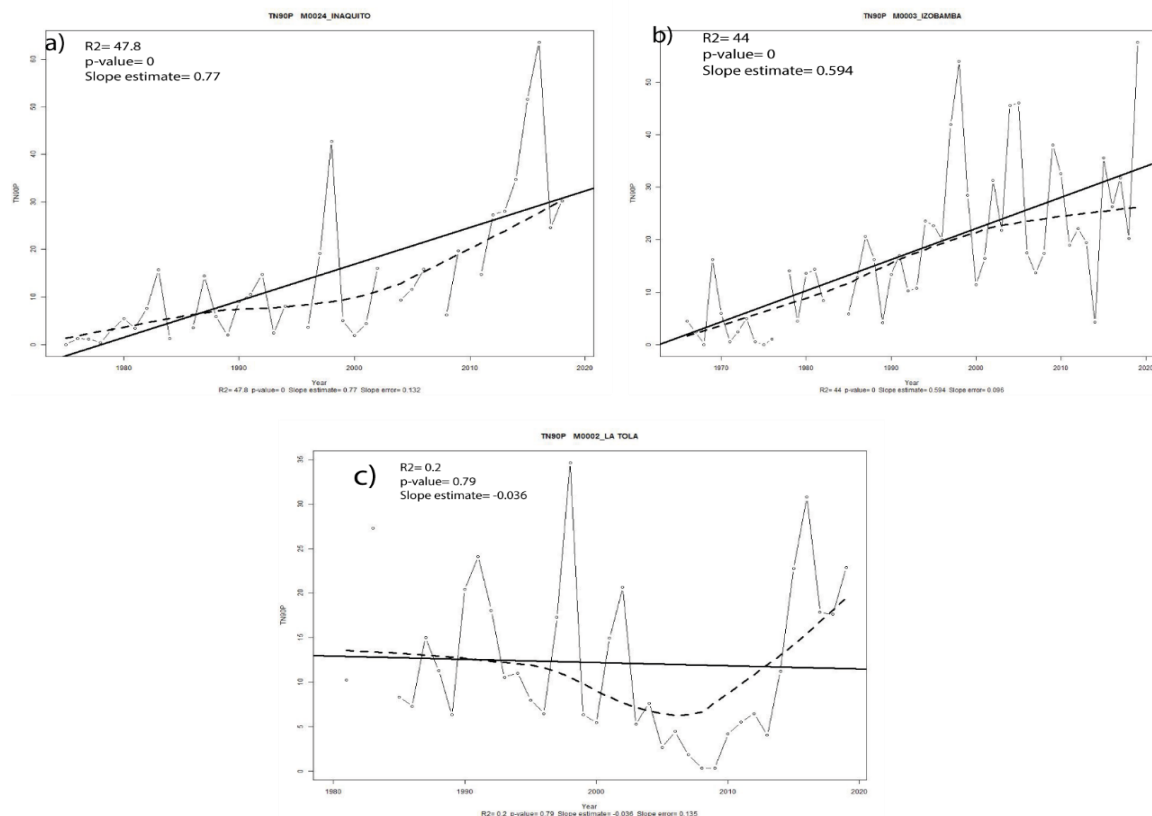
En la estación de La Tola c), existe un p-value de 0.402 y una pendiente positiva de 0.074, y como se puede observar en la imagen los cambios drásticos de temperatura a lo largo de 39 años, han ido ascendiendo y descendiendo. En el año 2010, esta temperatura alcanza más del 27.87% de noches frías, mientras que para el año 2019 el descenso ha llegado al 3 %noches/año.

La notable disminución de las noches frías en las estaciones urbanas se debe no sólo a los efectos causados por el cambio climático sino también al efecto isla de calor urbana, que se caracteriza por el aumento del calor acumulado en el día por las estructuras de concreto y asfalto y su posterior liberación durante las noches. En contraste, la disminución de noches frías en la Tola, estación rural no se mantiene.

5.3.1.2 Porcentaje De Noches Cálidas (Tn90p).

Figura 38.

Resultado gráfico de porcentaje de días en los que $TN > 90p$ de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La figura indica el aumento del porcentaje de noches cálidas. Elaborado por: Santillán K., Zamora

Este índice muestra los días en que las noches cálidas que superan el percentil 90, como se puede observar en la Figura 38, para Iñaquito a), ha existido una variación homogénea, es decir a seguido un patrón de aproximadamente de 5 años desde 1975 hasta el 2019, esta estación cuenta con un p-value de 0, siendo altamente significativo e indica que el porcentaje de días, cuando las noches son cálidas han tenido un incremento de 0.77, valor correspondiente a la pendiente. Además, se puede visualizar que existen picos altos en 1998 de 42.73 %noches/año y en 2016 con 63.58 %noches/año en los la temperatura mínima sobrepasa el percentil 90. En cuanto a Izobamba b), cuyo histórico de datos es desde 1965 hasta el 2019, la gráfica se muestra un tanto similar, puesto que su p-value es

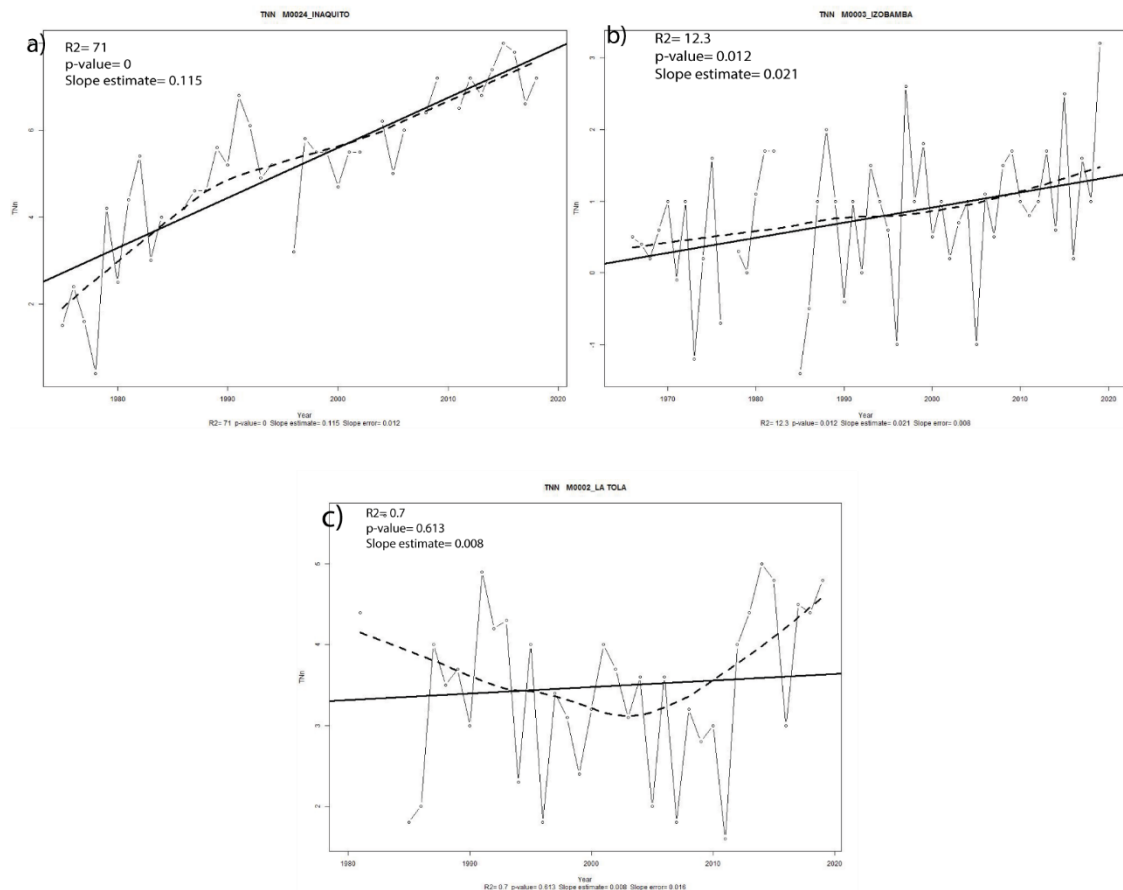
igualmente de 0 y su pendiente de tan solo 0.594. Además, posee un R cuadrado de 44, lo cual refleja que el modelo se ajusta perfectamente e indica una variación altamente significativa. Como se puede observar existe aumento de días con noches cálidas a partir del año 1997 hasta el 2019 con valores oscilan entre 41.97 hasta 57.68 %noches/año.

Finalmente, para La Tola c), cuya estación es la que se encuentra a menor altura se puede observar que de acuerdo a la pendiente de -0.036, las noches cálidas han ido decreciendo a partir del año 1999, sin embargo, este descenso se ha visto interrumpido desde el año 2005 hasta el 2009 aumentaron a 31%noches/año. La presencia de estos años inusualmente cálidos, se puede deber a efectos locales, ya que no son compatibles con efectos oscilantes como el Fenómeno del Niño, que tiene un período entre 7 y 11 años, o Madden-Julian, que tiene un período de 4 años, o la oscilación Decadal del Pacífico que tiene un período de 10 años.

5.3.1.2 Temperatura Nocturna Mínima (TNn).

Figura 39.

Resultado gráfico de valor mínimo temperatura mínima de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La figura indica los valores mínimos de temperatura obtenidos. Elaborado por: Santillán K., Zamora

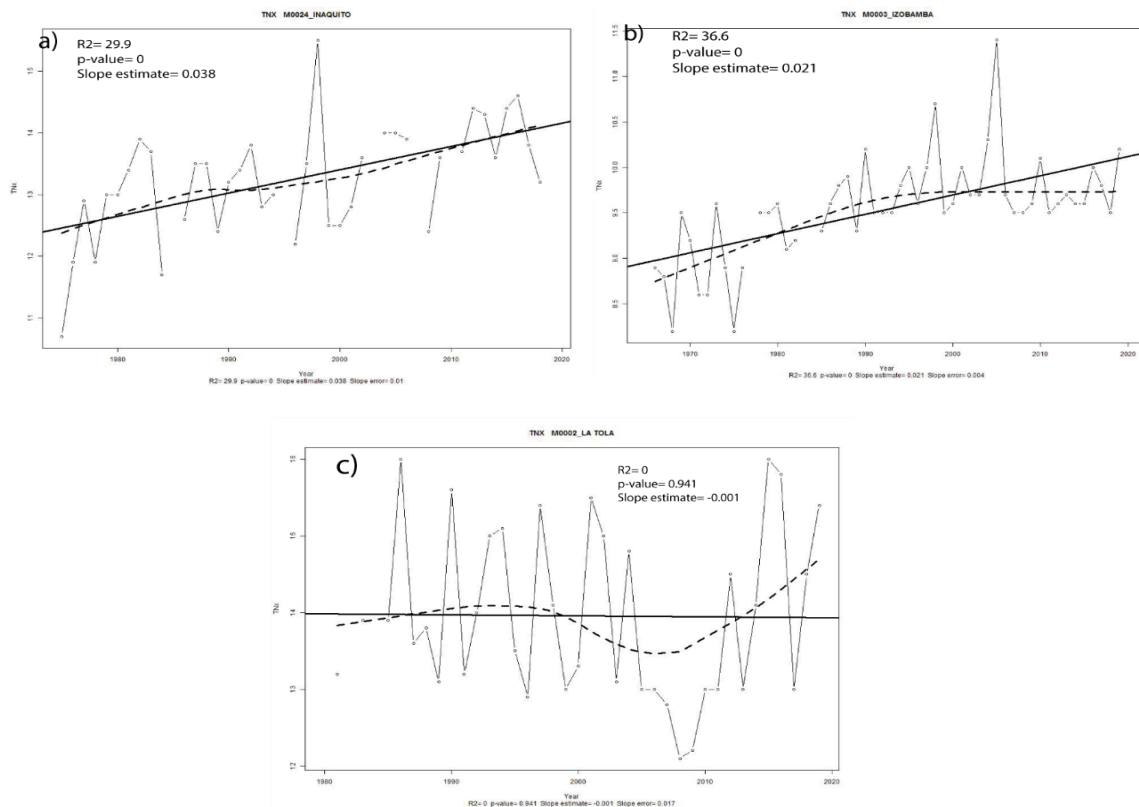
En la Figura 39 se muestra los valores mínimos obtenidos de temperatura mínima diaria de las estaciones del INAMHI. Para Iñaquito a), los valores representativos de p-value con 0 y pendiente de 0.115 indican que ha habido un incremento de 88.5 % de temperaturas mínimas desde 1980 hasta el 2019, y con un intervalo de confianza del 100% y sus valores se encuentran alrededor de 3 y 4°C, teniendo una disminución considerable de 0.4°C en 1978. En cuanto a Izobamba b), la gráfica indica que este rango de temperatura ha sido ligeramente variable durante 54 años, puesto que se puede ver con claridad un crecimiento y decrecimiento un tanto homogéneo ya que sus valores oscilan entre 0.2°C y 3.2°C, así como también han existido temperaturas mínimas muy bajas en

los años 1973 y 1985 con -1.2°C y -1.4°C respectivamente. Esta estación posee un p-value de 0.012, existe un nivel de confiabilidad estadístico del 98.8 %. Mientras que, para la estación de La Tola c), este p-value de 0.613, la confiabilidad baja al 38.7%, con valores que van desde 1.6°C a 5.6°C . Sin embargo, se puede observar que la temperatura mínima diaria para esta estación ha tenido un comportamiento similar a las mencionadas anteriormente. Demostrando que Izobamba es la estación más fría.

5.3.1.3 Temperatura Nocturna Máxima (TNx).

Figura 40.

Resultado gráfico de valor máximo de temperatura mínima diaria de las estaciones del INAMHI
a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La figura indica los valores máximos de temperatura diaria registrada. Elaborado por: Santillán K., Zamora

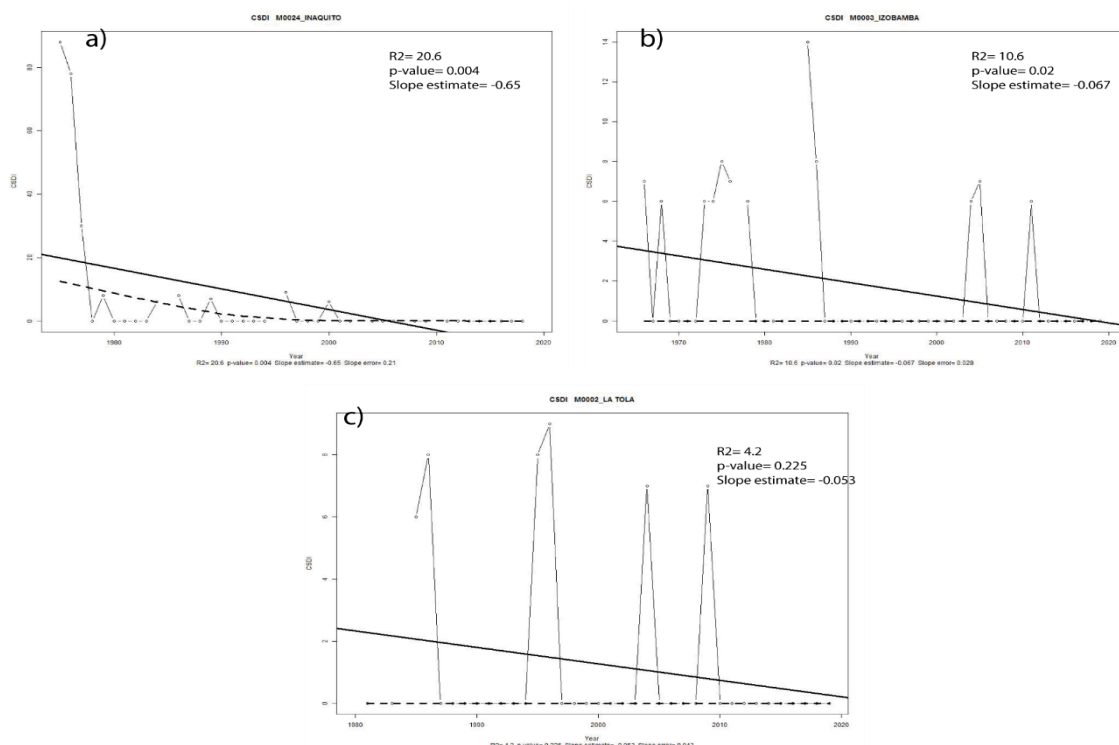
En la Figura 40 se puede observar los valores máximos registrados de temperatura mínima diaria para las estaciones (a, b y c). Estos datos han sido tomados y por ende registrados en horas de la mañana, es decir las primeras horas de la madrugada que

reflejan en si la temperatura nocturna. Para Iñaquito a), se puede apreciar un incremento de $0.038^{\circ}\text{C/año}$. Para el año de 1975 estos valores estaban alrededor de 10.7°C , en el año 1998 esta temperatura puede alcanzar los 15.5°C y volvió a descender hasta el año 2019 a aproximadamente 13.2°C . Para Izobamba b), cuya significancia estadística es del 100%, la pendiente positiva, que indica un aumento en $0.021^{\circ}\text{C/año}$, desde el 1965 hasta 1975, esta temperatura mínima estaba alrededor de 8.2°C y 9.5°C y ha ido aumentando hasta llegar a un punto máximo en 2005 de aproximadamente 11.4°C y descensos periódicos de hasta 9.5°C . Mientras que para la estación de La Tola c), se puede apreciar claramente intervalos de temperatura oscilantes de entre 12.1°C y 16°C , los cuales varían uniformemente durante 39 años.

5.3.1.5 Duración De Los Periodos Fríos (CSDI).

Figura 41.

Resultado gráfico de duración de olas de frío de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La figura indica la duración de periodos fríos. Elaborado por: Santillán K., Zamora

En la Figura 41, para la estación de Iñaquito a), se puede observar según los resultados de RClimdex que existe una disminución de -0.65 periodos fríos consecutivos, los cuales se ven reflejados en los años de 1975, 1976, 1977, 1984, 1986, 1989, 1996 y 2000 con 88, 78, 30, 6, 8, 7, 9 y 6 días consecutivos con periodos fríos respectivamente. Mientras que a partir del año 2001 hasta el 2019 estos dejaron de existir.

De igual manera para Izobamba b), se puede observar que su decrecimiento ha sido de -0.067 días y su p- value de 0.02 demuestra que la gráfica obtenida es altamente significativa y la variación de los periodos fríos consecutivos han ido variando desde 1966 hasta 1978 de entre 8 y 6 días, subiendo considerablemente el año 1985 con 14 días y 1986 con 8 días, volviendo a disminuir con 0 días hasta el 2004, puesto que el 2005 cuenta con 7 días y el 2011 con 6 días consecutivos con periodos fríos.

Desde el 2012 al 2019, no existen valores que demuestran la presencia de esta variable.

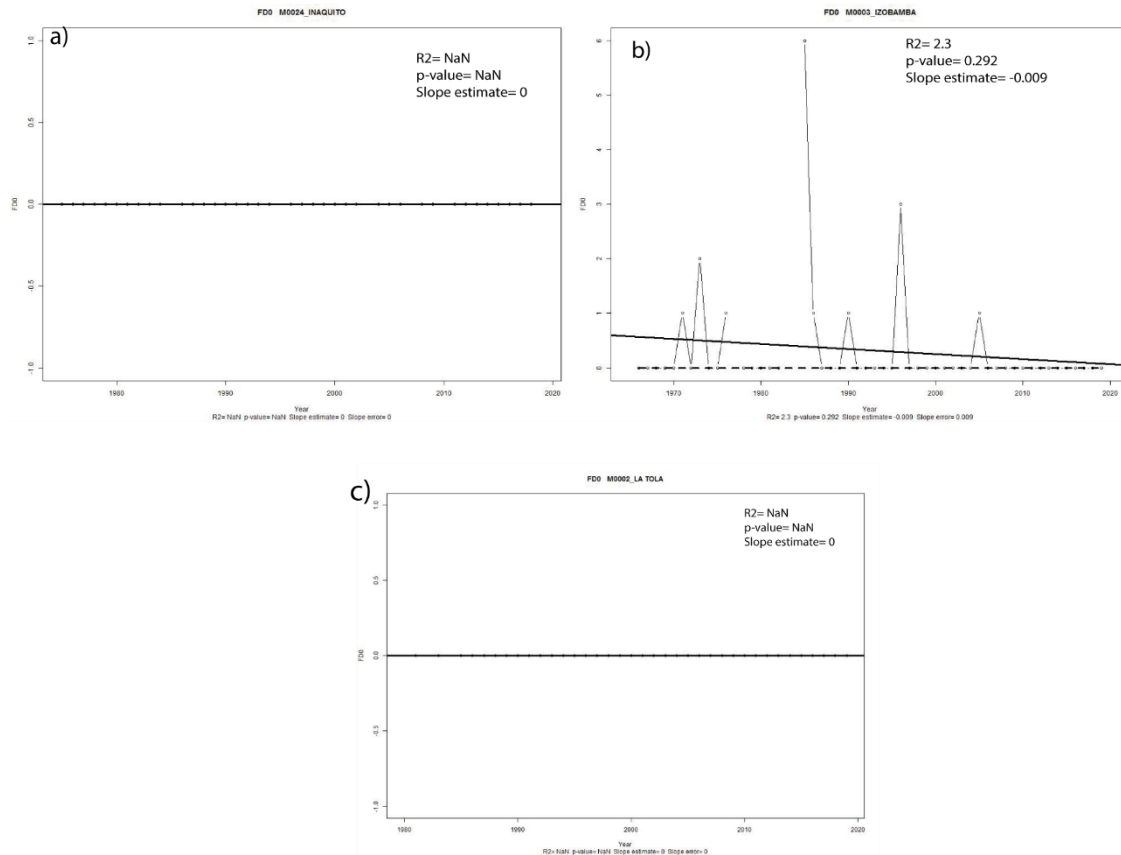
Finalmente, para la estación de La Tola c), con un p- value de 0,225 y una pendiente de -0,053, los periodos fríos consecutivos han ido disminuyendo con mayor intensidad, desde 1985 hasta el 2009 con alrededor de 7 a 9 días en los que existieron periodos fríos.

Para a) CSDI ocurre cada 6 años aproximadamente, mientras que para b) CSDI ocurre entre 12, 8 y 6 años y en c) de 8, 7 y 4 años con CSDI.

5.3.1.6 Días Con Heladas (FD0).

Figura 41.

Resultado gráfico de días con heladas de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen muestra las estaciones que han tenido presencia de heladas. Elaborado por: Santillán K., Zamora

Debido a que este índice describe los días con heladas, es decir, con temperaturas bajo 0°C , no es común encontrar estos eventos en Quito, a excepción de la estación de Izobamba, en donde sí se registran valores mínimos de temperatura. Dicha estación es una de las más antiguas y más altas instaladas en el DMQ, ya que cuenta con 54 años y está situada a una altura de 3058.00 msnm. Debido a su localización no se ve directamente afectada por el efecto isla de calor urbano, puesto que se encuentra lejos de la ciudad y de las grandes cantidades de concreto y asfalto que contribuyen a que la temperatura por las noches se eleve a niveles anormales y exista un sobrecalentamiento por la emisión de gases efecto invernadero.

En la Figura 42 se puede observar que no existe presencia de heladas en las estaciones de Iñaquito a) y La Tola c), mientras que para la estación de Izobamba b), el panorama es un poco distinto. Al ser una de las estaciones más antiguas y más altas, se puede deducir que es una de las más importantes en el Ecuador, y por lo tanto posee un p-value de 0.292, que indica una significancia estadística del 70.8%. a pesar de que exista una disminución de -0.009 días con heladas/año, la variación se ha ido dando desde 1971, 1986, 1990 Y 2005 con 1 día, en 1973 y 1996 con 2 y 3 días y 1985 con 6 días en los que existe presencia de heladas. Desde el año 2006 hasta la actualidad, no se han registrado temperaturas menores a 0°C.

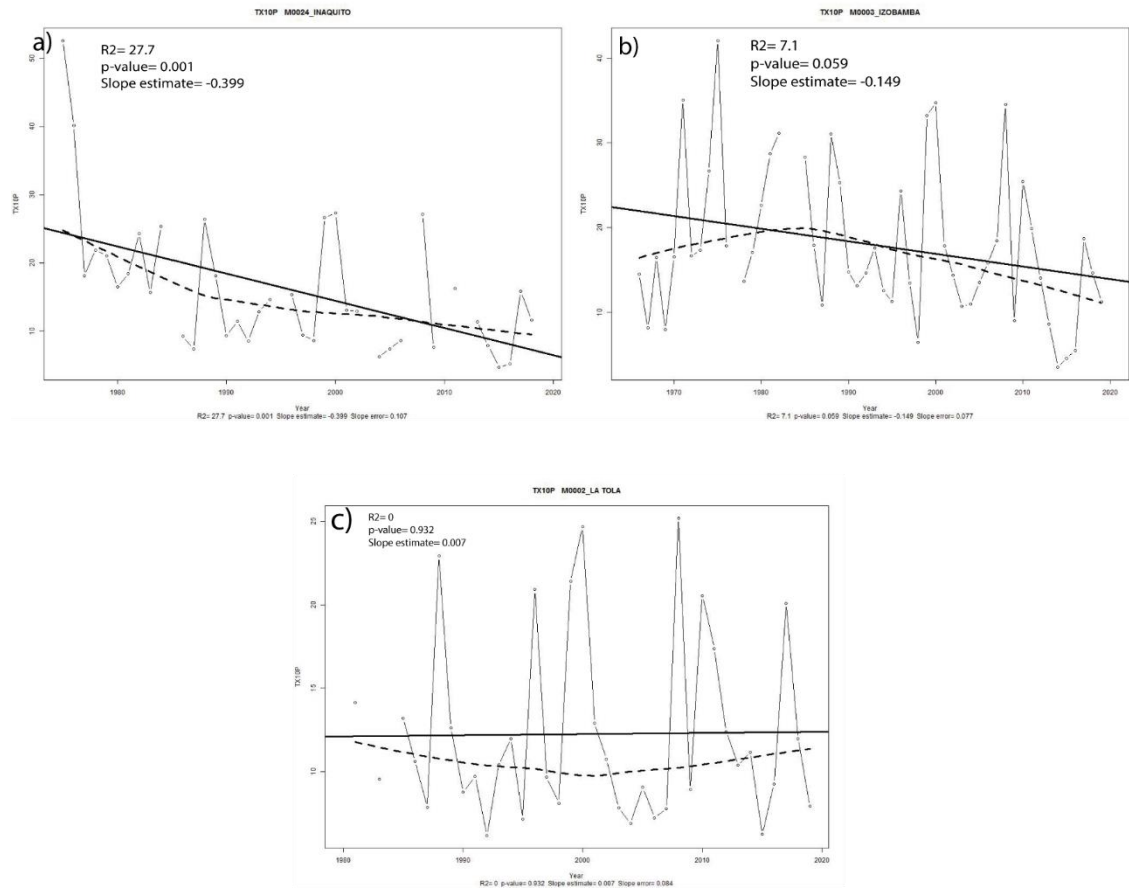
5.3.2 *Temperatura máxima*

Para la descripción de los índices correspondientes a este índice de temperatura es necesario el análisis de todas aquellas variables que registran valores máximos de temperatura durante el día.

5.3.2.1 Días Fríos (TX10p).

Figura 42.

Resultado gráfico de porcentaje de días en los que la TX < 10p de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen muestra el porcentaje de días fríos con respecto a la temperatura máxima. Elaborado por: Santillán K., Zamora

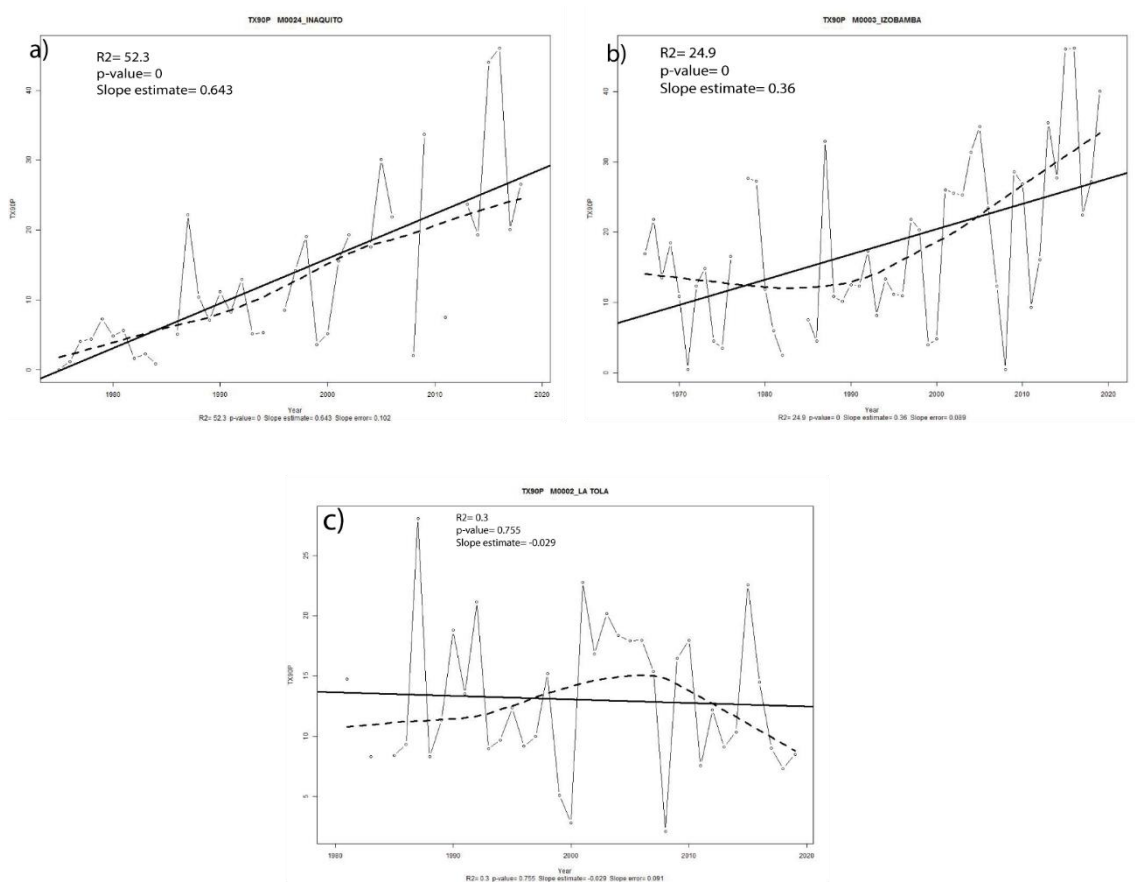
En la Figura 43, el índice TX10p indica el porcentaje de días fríos que sobrepasan el percentil 10, en la estación de Iñaquito a), existe aproximadamente un 28% de días fríos, sin embargo, se puede apreciar que estos han ido disminuyendo en un 0.149 día/año. Teniendo su valor máximo 1975 con 52.65% y el mínimo en el 2015 con 4.75%. Para Izobamba b), el índice de días fríos ha sido altamente variable a lo largo de 54 años, a pesar de haberse reducido en un 0.149 día/año, a pesar de ser la estación con mayor altura sus valores se encuentran alrededor de 35.09% y 4.52%. Mientras que, para La Tola c),

se han incrementado en un 0.007 día/año con alrededor de 20.09%. Lo que podría decirse que estos días fríos han aumentado, pero no considerablemente ni por periodos muy extensos. Sin embargo, para esta estación existe un p-value de 0.932, lo que indica que la significancia estadística no es representativa.

5.3.2.2 Días calurosos (TX90p).

Figura 43.

Resultado gráfico de porcentaje de días en los que $TX > 90$ de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen indica el aumento en porcentaje de días cálidos. Elaborado por: Santillán K., Zamora

En la Figura 44 de acuerdo al índice TX90p, se puede observar que para Iñaquito a), el porcentaje de días cálidos ha aumentado en 0.0643 días/año, y estos han ido siendo relativamente constantes durante un periodo de 44 años. Lo que no indica variaciones considerables ni preocupantes. Mientras que para Izobamba b), dicho aumento se

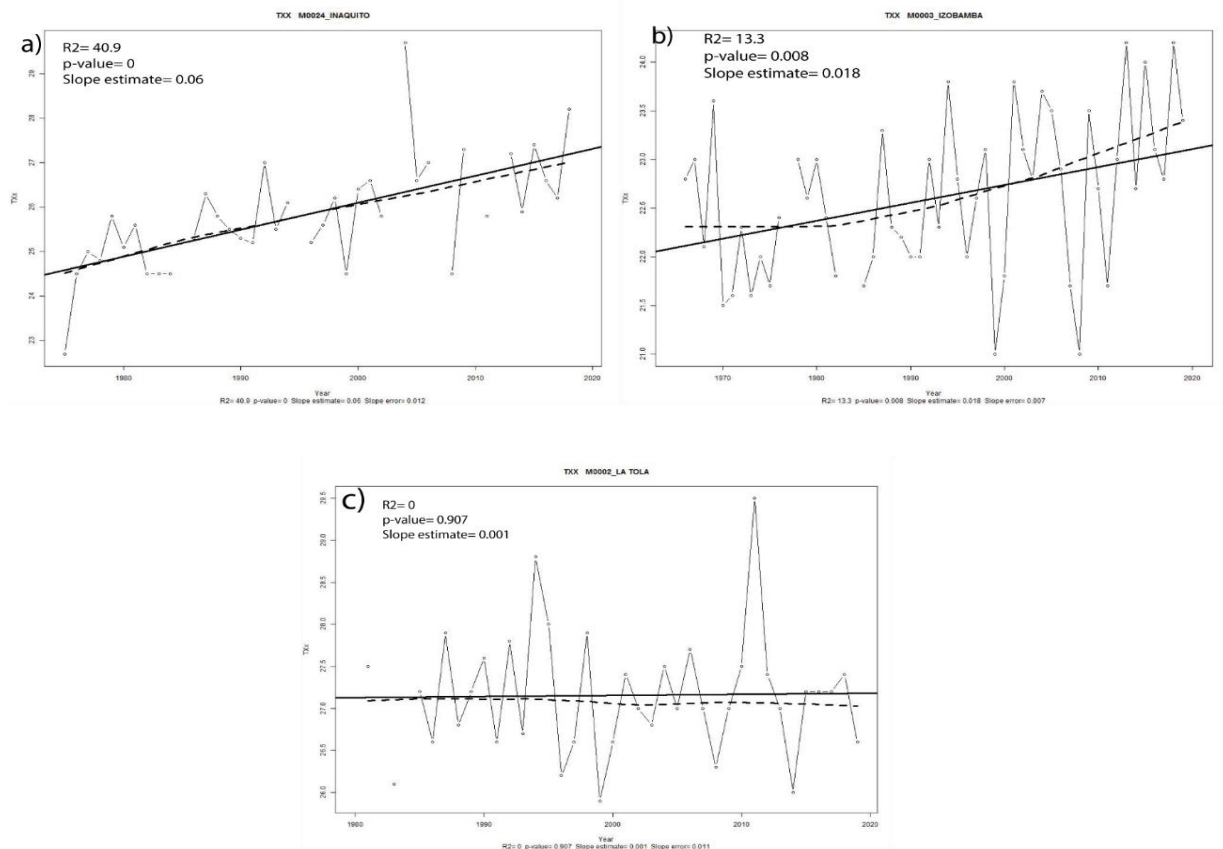
encuentra definido por 0.36 días/año, con una significancia estadística del 100%. Además, se puede visualizar que ha ido aumentando y disminuyendo la temperatura desde 0% hasta un 50% aproximadamente.

Finalmente, en la estación de La Tola c), se refleja una pequeña disminución de 0.029 días cálidos/año. Con picos de temperatura que suben hasta 30% y disminuyen hasta en 2% en los años de 1986 y 2009 respectivamente. Mientras que existen picos altos en los años de 1987, 1992, 2001 y 2015 de 28.1%, 21.15%, 22.82% y 22.59% de días cálidos.

5.3.2.3 Valor Máximo De Temperatura Máxima Durante El Día (TXx).

Figura 44.

Resultado gráfico de valor máximo de temperatura máxima diaria de las estaciones del INAMHI a) Ñañaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La figura muestra los valores máximos de temperatura máxima diaria. Elaborado por: Santillán K., Zamora

Para la Figura 45 el valor máximo de temperatura máxima diaria de la estación de Iñaquito a) se ha incrementado en 0.06°C y con una significancia estadística del 100%. La temperatura máxima ha aumentado desde 22°C hasta 30°C desde 1975 al 2003 respectivamente, y para el 2018 ha bajado a razón de 1.5°C , ya que se registra una temperatura de 28.2°C en promedio para dicho año.

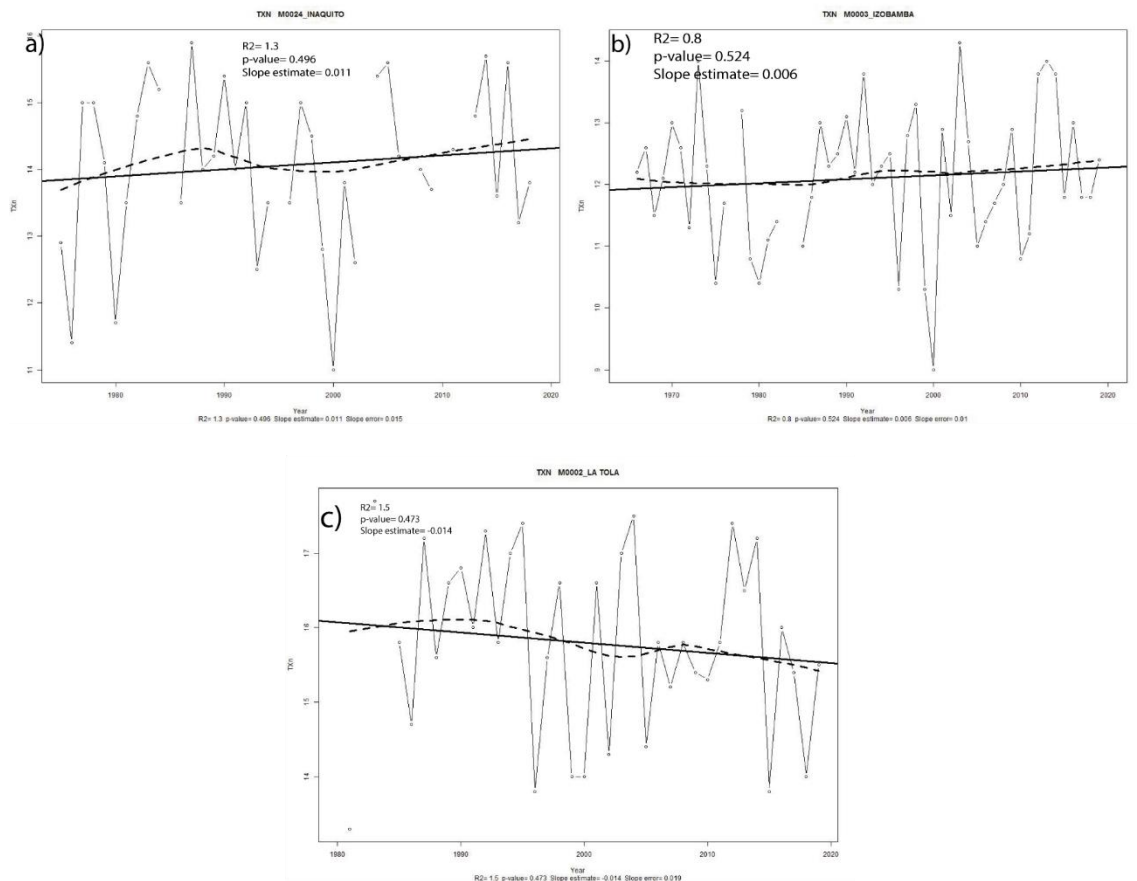
Para la estación de Izobamba b), el incremento de temperatura se ha evidenciado en 0.018°C , pero con una variación casi constante a lo largo de los años de aproximadamente 23.5°C . A excepción de los años 1999 y 2019, en los cuales la temperatura ha llegado a 21°C . Sin embargo, para el 2019 subió a 24.5°C .

En la estación de La Tola, el aumento ha sido casi imperceptible, con una pendiente positiva que muestra un aumento de 0.001°C y una media de 28°C por ser la estación con menor altura de las tres registradas en el presente estudio.

5.3.2.4 Valor Mínimo De Temperatura Máxima Durante El Día (TXn).

Figura 45.

Resultado gráfico de valor mínimo de temperatura máxima diaria de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen muestra los valores máximos de temperatura máxima diaria. Elaborado por: Santillán K., Zamora

Para la Figura 46, se muestra el valor mínimo de temperatura máxima durante el día, valores que son registrados generalmente durante la mañana, en sus primeras horas. Para Iñaquito a), se puede visualizar un incremento de 0.011°C , con valores máximos en 1983 y mínimos en el 2000, de 15.6°C y 11°C respectivamente. Mientras que para Izobamba b), cuya temperatura máxima es de 14.3°C en el año 2003, este incremento se ha dado en 0.006°C , y se ha logrado registrar una disminución muy marcada para el año 2000 de 9°C .

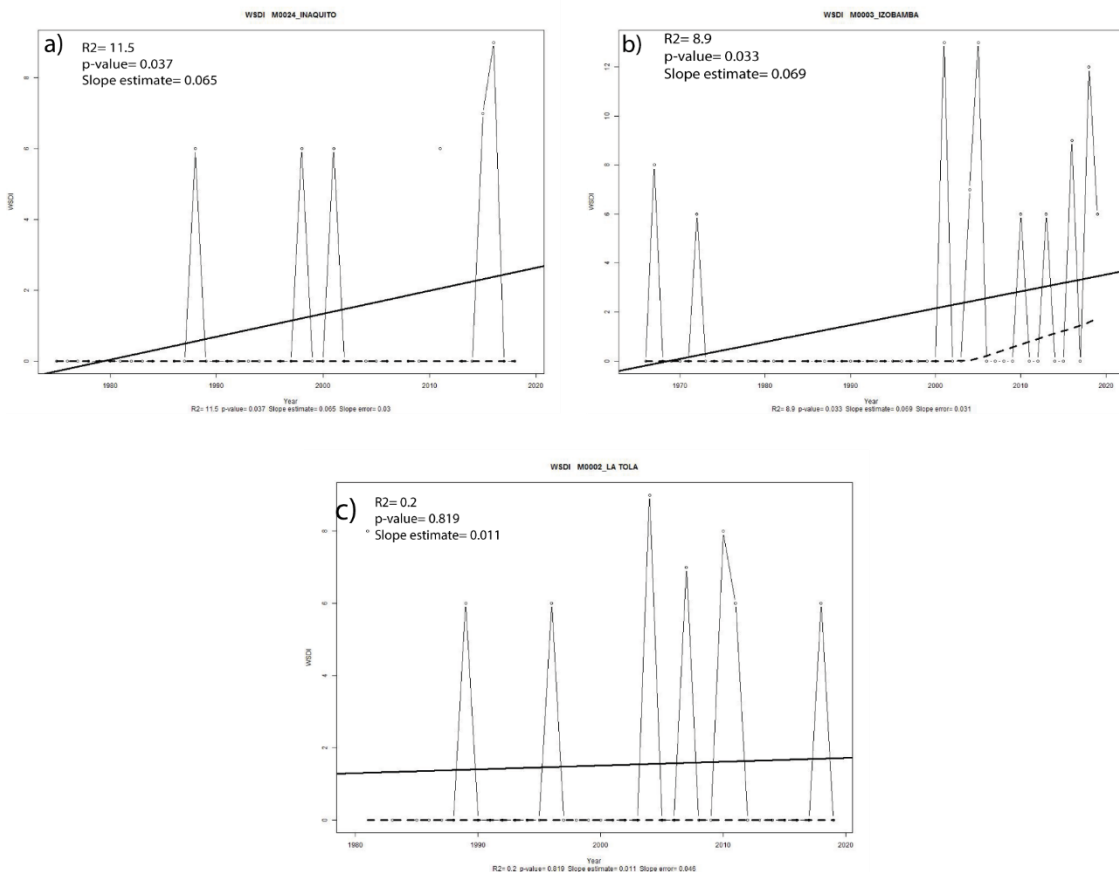
Finalmente, para la estación de La Tola c), se ha dado un descenso de 0.014°C , con varios picos mínimos de temperatura máxima de hasta 14°C , siendo 17.7°C la temperatura más alta y la mínima de 14°C en el 2018.

Para este índice con los resultados de RClindex se obtuvo una p- value de 49.6, 52.4 y 47.3% para Iñaquito, Izobamba y La Tola respectivamente, es decir cuentan con menos del 60% de significancia estadística.

5.3.2.5 Duración De Periodos Cálidos (WSDI) U Olas De Calor.

Figura 46.

Resultado gráfico de recuento anual de días con al menos 6 días consecutivos cuando $TX > 90$ de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



*Nota: La imagen indica el recuento anual de 6 días consecutivos que sobrepasan el percentil 90.
Elaborado por: Santillán K., Zamora*

En la Figura 47, se muestra la temperatura máxima diaria, correspondiente a 6 días consecutivos en los que la temperatura máxima sobrepasa el percentil 90.

En la estación de Iñaquito a), se puede observar que existe un incremento en la pendiente de 0.065 días y una significancia estadística de 96.3%. Además, se muestra que existen picos de WSDI para los años 1988, 1998, 2001, 2011 con 6 días consecutivos y para el año 2015 y 2016 con 7 y 9 días consecutivos de temperatura máxima que ha sobrepasado el percentil 90 respectivamente.

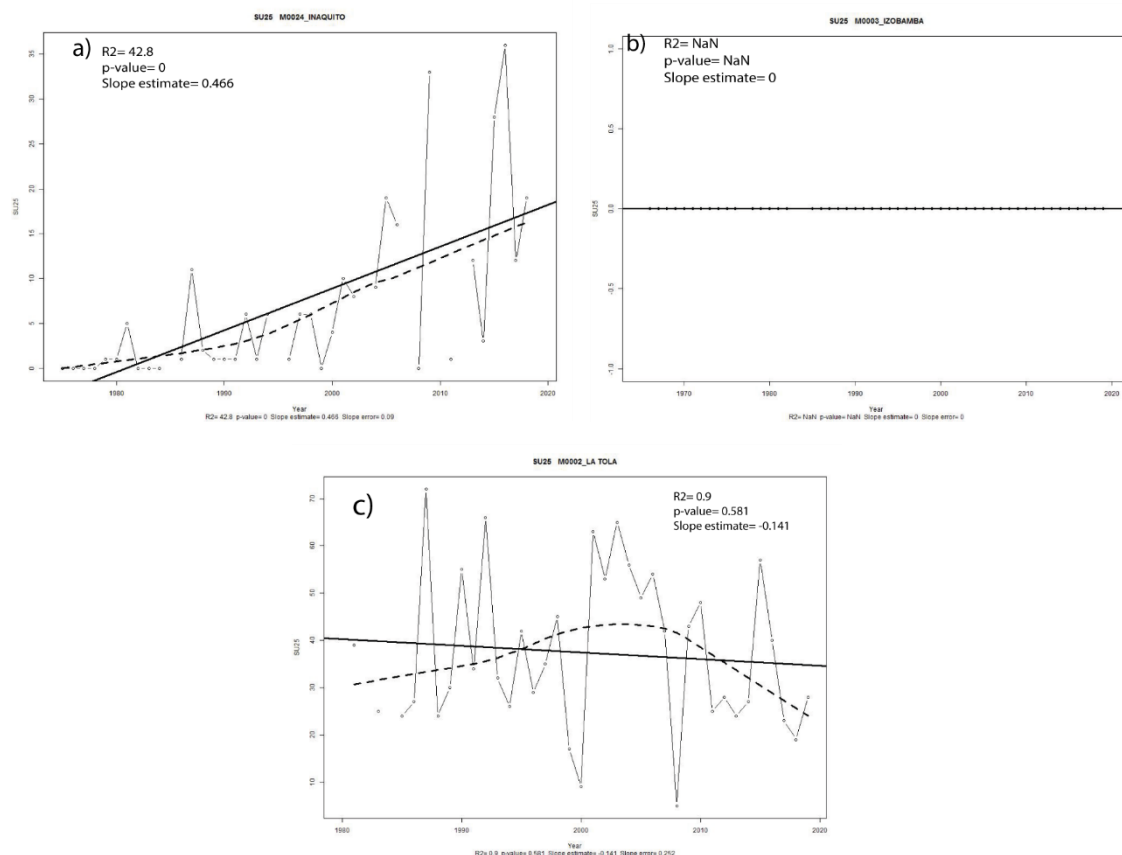
Para Izobamba b), con un crecimiento de 0.819 días y un p-value de 0.011, se refleja valores desde el año 1967 con 8 días, en 1972 con 6 días, y después de 29 años, en el 2001 con 13 días, en 2004 y 2005 con 7 y 13 días. Y en periodos más cercanos desde 2010, 2013, 2016, 2018 y 2019 con 6, 6, 9, 12 y 6 días registrados con olas de calor cada 2 y 3 años.

Finalmente, para la estación de La Tola c), existe una mayor cantidad de días consecutivos en los que la temperatura sobrepasa este valor y empiezan desde 1981 con 8 días, en 1989, 1996, 2011 y 2018 todos con 6 días y en 2007 con 7 días. Esta estación posee una pendiente de 0.011 y una significancia estadística del 18.1%.

5.3.2.6 Días De Verano (SU25).

Figura 47.

Resultado gráfico de días de verano cuando la temperatura máxima sobrepasa los 25 °C de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen indica los días en los que la temperatura ha superado los 25°C. Elaborado por: Santillán K., Zamora

En la Figura 48 el índice mostrado refleja los días de verano en el que la temperatura máxima en Quito supera los 25 °C.

La estación Iñaquito a), indica un p-value de 0, lo que quiere decir una confiabilidad de datos al 100%, se puede visualizar claramente que la pendiente, de 0.466 ha ido aumentando conforme al paso del tiempo desde 1979 hasta el año 2018 han existido periodos consecutivos de SU25. Sin embargo, existen dos puntos importantes en los que se muestran picos de temperatura extremadamente elevados de entre 33 y 36 días/año, en 2009 y 2016 respectivamente, lo cual podría referirse a eventos extremos de un aumento de días de verano que han sobrepasado los 25°C.

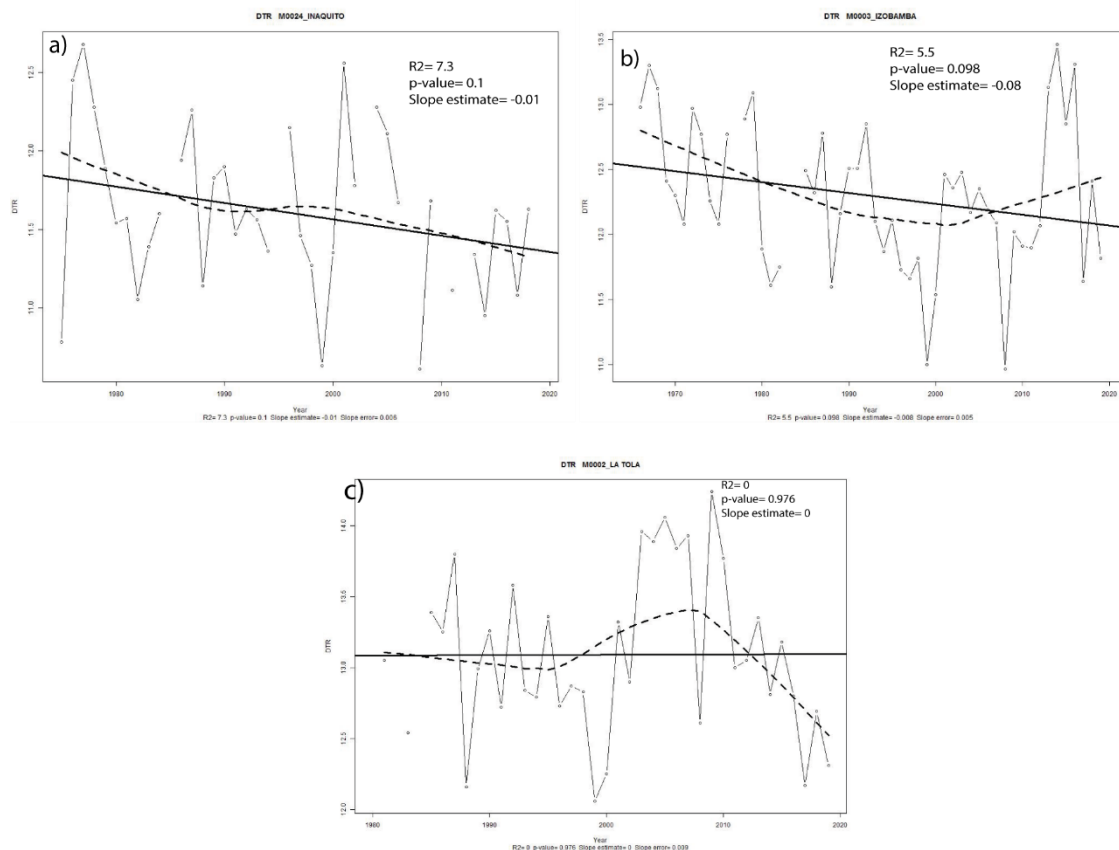
Para la estación Izobamba b), no se muestran temperaturas que superen el índice SU25, lo cual puede deberse a la diferencia de condiciones, puesto que esta estación en especial es la más alejada de la zona urbana y por lo tanto la influencia del calentamiento global debido a los gases efecto invernadero no se encuentran relacionados directamente con la misma y por lo tanto es una de las estaciones más frías que posee el DMQ, ya que todavía no se registran valores que lleguen a los 25°C.

Finalmente, para la estación de La Tola c), su intervalo de confianza es de apenas 41.9% y existe un descenso en su pendiente de -0.141, por lo tanto, se puede visualizar claramente diferentes picos de temperatura, siendo los años 1987, 1992 y 2015 con 72, 66 y 57 días/ año respectivamente, mientras que en los años 2000 y 2008 el descenso de 9 y 5 días/año demuestran que ha habido una variabilidad altamente significativa de días de verano en 40 años.

5.3.2.7 Rango Diurno De Temperatura (DTR).

Figura 48.

Resultado gráfico de rango de temperatura diaria de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen indica el rango diurno de temperatura diaria. Elaborado por: Santillán K., Zamora

En la Figura 49 se reporta el índice DTR que representa el rango de temperatura que oscila en el día en el DMQ.

En las figuras a) correspondiente a Iñaquito, el rango de temperatura va disminuyendo desde 12.68°C en 1977 a 10.61°C en el 2008. De la misma manera a partir del 2009 hasta el 2019 existe un cambio de hasta 0.5°C y que de acuerdo a la significancia estadística del 90% y un pequeño descenso en la pendiente de -0.01 , indica que no ha habido una variabilidad climática muy marcada en 45 años.

De igual manera para Izobamba b), con 54 años de datos, la confiabilidad estadística es de 90.2% y una pendiente negativa de -0.08°C . Lo cual indica un promedio de temperatura de 13.3°C en 1967 y 11.64°C en el 2017. Sin embargo, existen dos picos en el descenso de 11 y 10.97°C en los años 1999 y 2008.

Finalmente, para La Tola c), el rango de temperatura va de 12.06°C a 14.24°C lo que significa que en dicho sector no existe una mayor variabilidad del rango de temperatura. Aquí se puede observar que la pendiente es de 0 y la confiabilidad estadística es muy baja, ya que es de apenas 2.4%.

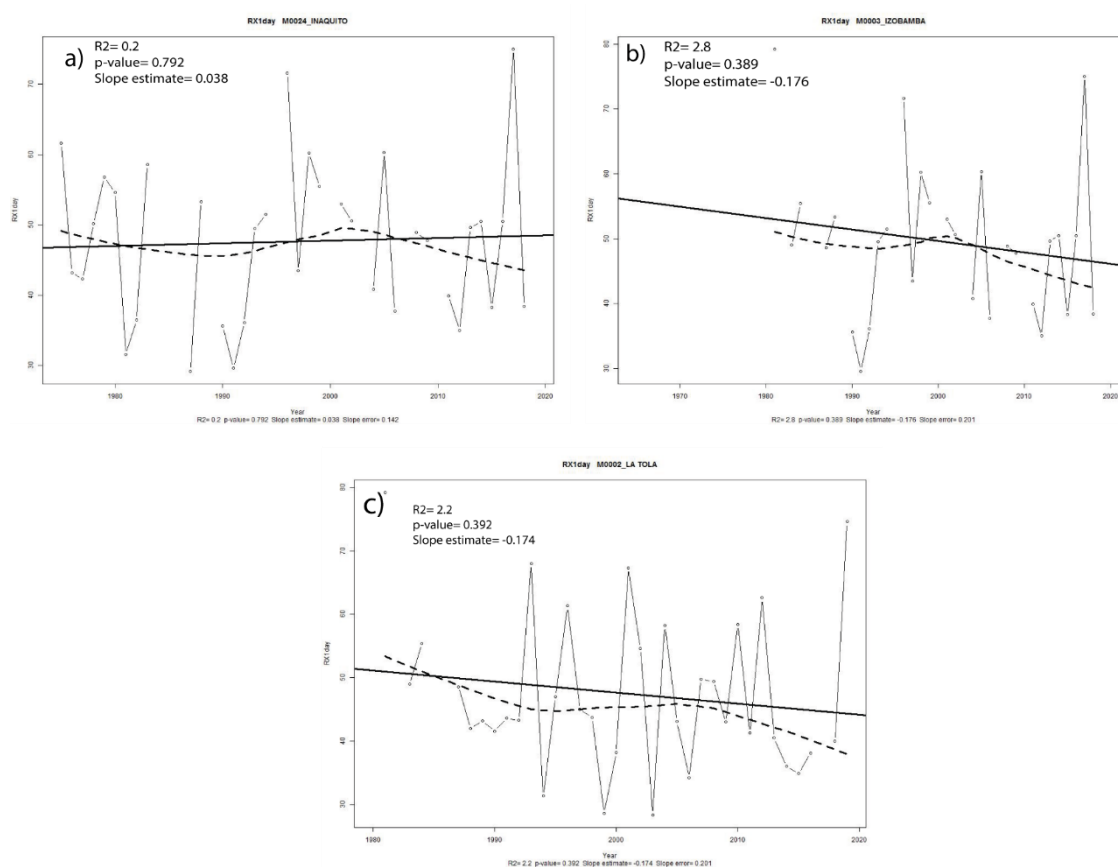
De esta manera se puede visualizar que, para la estación de Iñaquito, que se encuentra más cerca de la ciudad, la temperatura disminuye, mientras que para Izobamba, que está alejada apenas baja y en la tola ubicada en los valles se mantiene, lo que podría decir que este índice va disminuyendo en la ciudad debido a que las temperaturas mínimas se incrementan más rápido que las máximas, lo cual corrobora el efecto isla de calor urbano.

5.3.3 Precipitación

5.3.3.1 Precipitación Máxima En 1 Día (RX1day).

Figura 49.

Resultado gráfico de precipitación máxima en un día de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen muestra los rangos de precipitación máxima en un día. Elaborado por: Santillán K., Zamora

La Figura 50 representa la cantidad de precipitación o lluvia en el día que se produce en los distintos sectores de la ciudad. Este índice nos puede reflejar si han existido inundaciones a través del tiempo. Para la estación Iñaquito a), hay un valor altamente significativo con un p-value de 0,792, un R² de 0,2 y un aumento en su pendiente de 0.038 mm/mes cuyo promedio de precipitaciones es de hasta 50 mm/mes. Sin embargo, se pueden observar dos puntos importantes en 1996 y 2017 con un aumento precipitaciones en 1 día de 71.6 y 75 mm/mes respectivamente.

Para la estación de Izobamba b), varía de 35.6 mm/mes desde 1990 hasta 75 mm/mes en el año 2017 y en el 2018 38.4 mm/mes. Sin embargo, la pendiente negativa

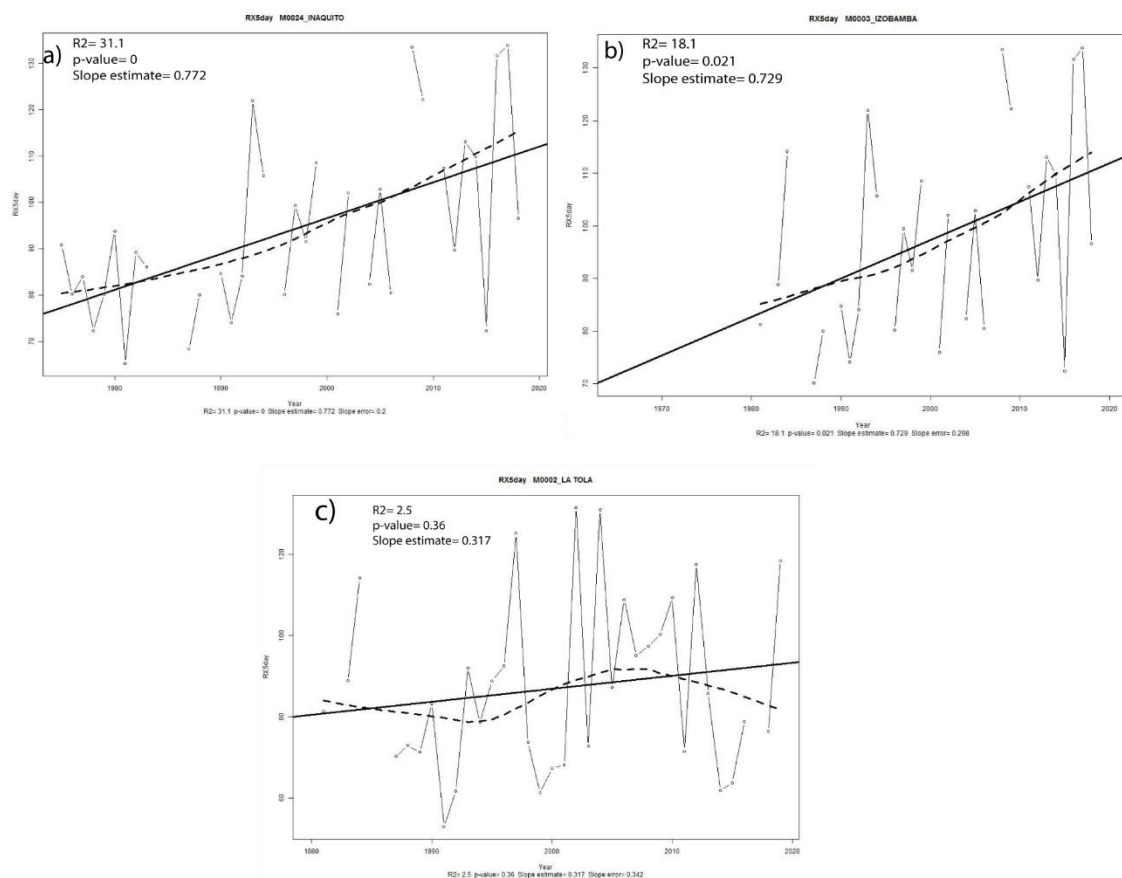
indica que ha habido un descenso de precipitaciones en 1 día de hasta 29.6 mm/mes en 1991.

En la estación de La Tola c), gráficamente la cantidad máxima de precipitaciones en 1 día ha sido altamente variable, desde 25 mm hasta 75 mm y a su vez han ido disminuyendo a razón de 0.174 mm/mes desde 1980 hasta el 2019. Siendo el pico más alto en el 2019 con 74.5 mm/mes y los más bajos en 1999 y 2003 con 28.6 mm/mes y 28.4 mm/mes respectivamente.

5.3.3.2 Precipitación Máxima En 5 Días (RX5day).

Figura 50.

Resultado gráfico de precipitación máxima en cinco días de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen muestra los rangos de precipitación máxima en cinco días. Elaborado por: Santillán K., Zamora

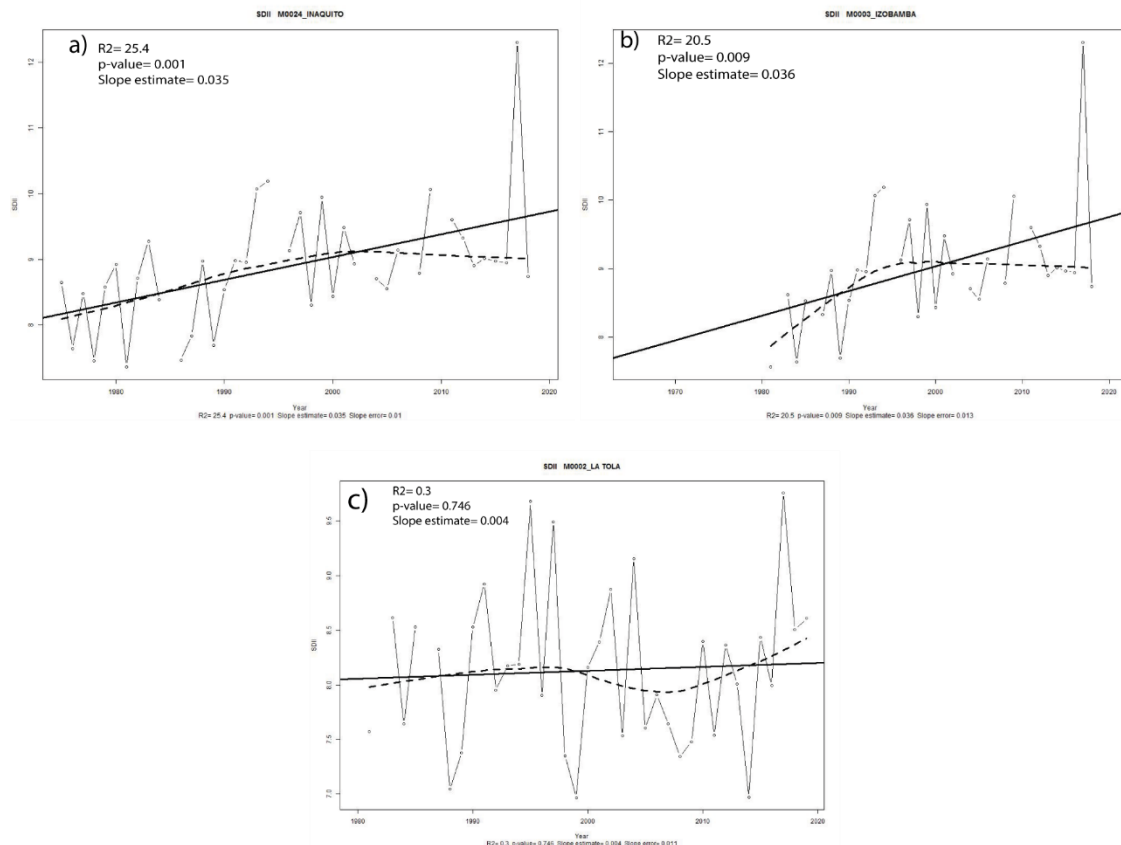
La Figura 51 representa la cantidad de precipitación en un periodo de 5 días para la ciudad de Quito. En las estaciones Iñaquito a) e Izobamba b) tienen un valor significativo con un p-value de 0 y 0.021 respectivamente, en 2017 en la estación de Iñaquito se logra un récord de 133.8 mm/mes, lo cual pudo ser la causa de la inundación en la plataforma financiera, ya que el aumento en las precipitaciones se refleja en sus pendientes de 0.772 mm y 0.729 mm.

Mientras que la estación La Tola c), tiene un p-value de 0,3; en el mes de abril del 2002 un valor de 131.4 mm/mes, pero desde el 2010 refleja una tendencia a la disminución con respecto a las otras dos estaciones mencionadas, ya que esta es de 0.317mm/mes.

5.3.3.3 Índice Simple De Intensidad Diaria (SDII).

Figura 51.

Resultado gráfico de precipitación anual en días húmedos mayores a 1 mm de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen muestra la cantidad de precipitaciones al año. Elaborado por: Santillán K., Zamora

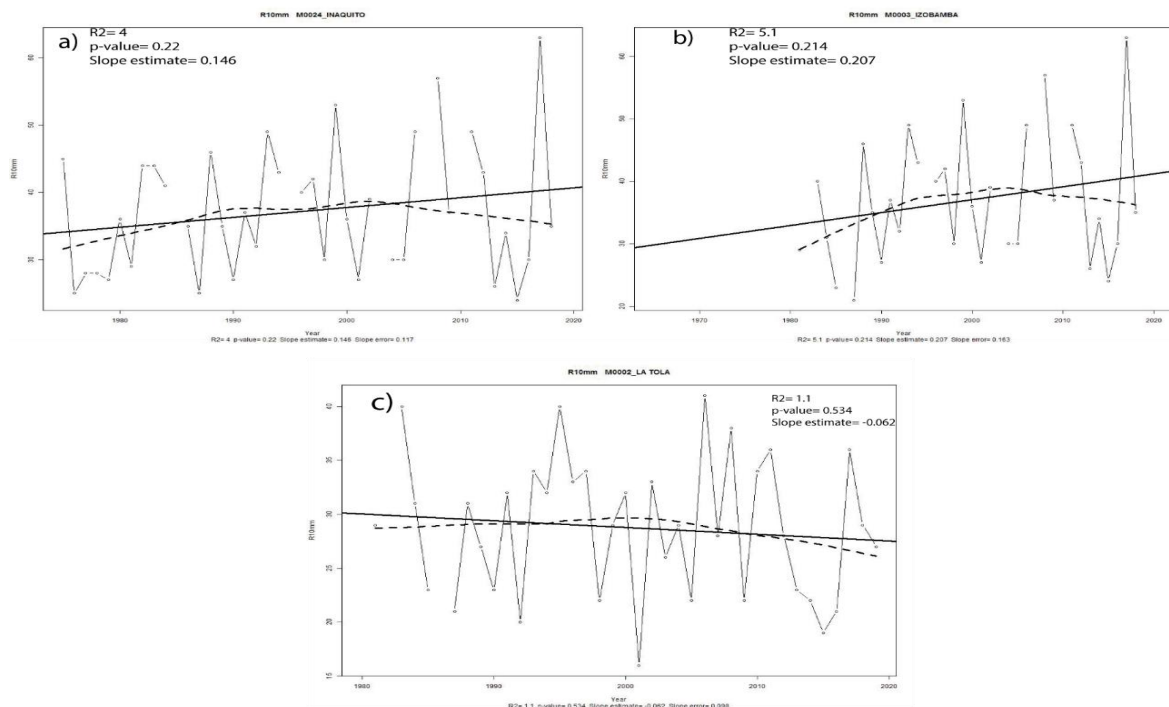
La Figura 52 representa la cantidad de lluvia al año superiores a 1mm para la ciudad de Quito. En las estaciones de Iñaquito a) e Izobamba b), tienen un valor significativo con un p-value de 0.001 y 0.009 respectivamente, demostrando que su confiabilidad estadística es altamente representativa y además indica un aumento constante en las precipitaciones de hasta 0.035 y 0.036 mm/día, así como también cuentan con un rango de precipitación anual de 7 a 12 mm/día. Las dos estaciones cuentan con un pico máximo de 12.3 mm/día en el 2017

Mientras que la estación de La Tola c), que tiene un p-value de 0.746 existe menos intensidad de lluvia anual, ya que su pendiente es de 0.004 mm/día, yendo desde los 7 mm/día hasta 9.8 mm/día en el 2017.

5.3.3.4 Días Con Lluvia Mayor a 10 mm (R10).

Figura 52.

Resultado gráfico de días con lluvia mayor a 10mm de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen muestra los rangos de precipitación mayor a 10 mm. Elaborado por: Santillán K., Zamora

La Figura 53 representa la cantidad de lluvia al año superiores a 10mm para la ciudad de Quito. En la estación de Iñaquito a), se visualiza una variación de lluvias intensas que van desde 25 a 63 días en los que sobrepasan los 10 mm, puesto que este aumento se ve marcado por una pendiente de 0.146 mm y una confiabilidad estadística del 78%. Para Izobamba b), se puede explicar estadísticamente que esta posee un p-value es de 0.214, y una pendiente que incrementa 0.207 mm de acuerdo a los datos estudiados

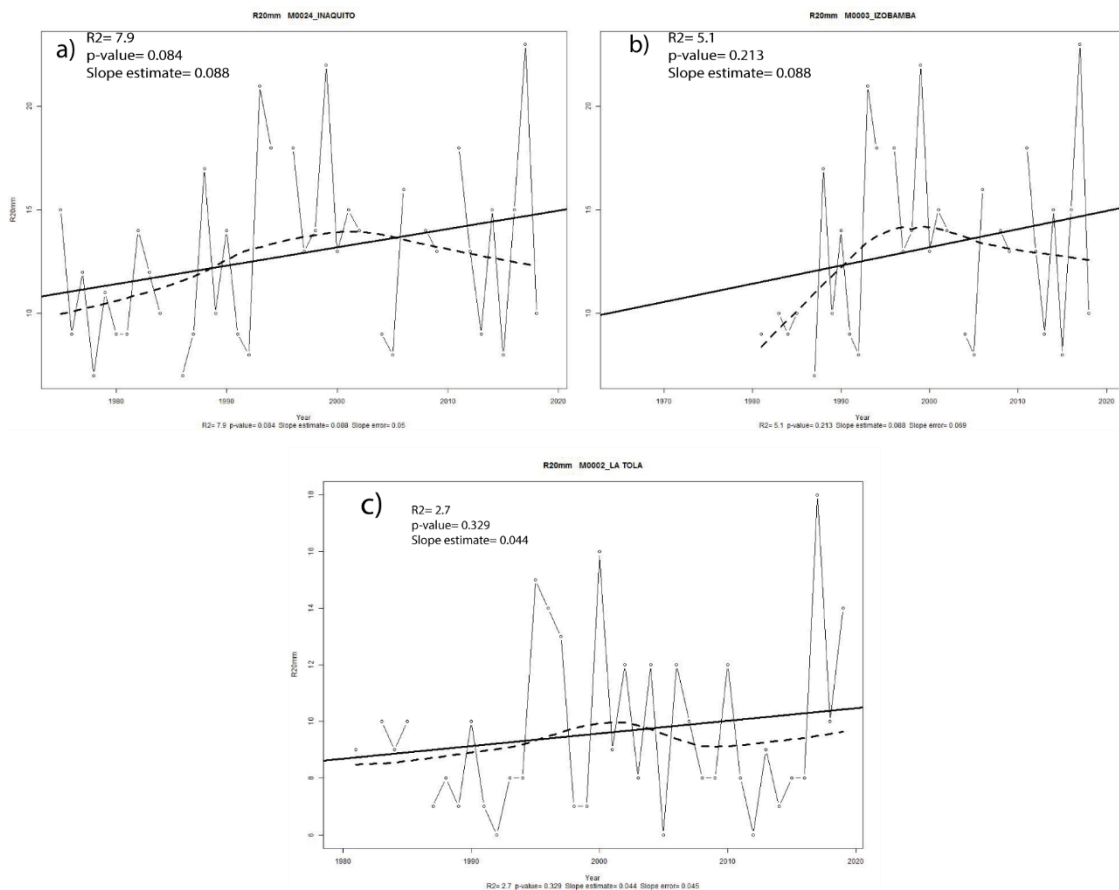
y su variación se encuentra marcada desde 1980 desde 23 hasta 63 días con lluvias intensas mayores a 10 mm en el 2019.

En la estación La Tola c), se observa gráficamente una variación que va desde 16 a 36 días en que la precipitación es mayor o igual a 10mm y se obtuvo un p-value de 0.534; lo que indica existe una ligera disminución en la cantidad de lluvia para los últimos años con -0.062 mm. En a) b) y c) el punto máximo se encuentra en el año 2017.

5.3.3.5 Días Con Lluvia Mayor a 20 mm (R20).

Figura 53.

Resultado gráfico de días con lluvia mayor a 20 mm de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen muestra los rangos de precipitación mayor a 20 mm. Elaborado por: Santillán K., Zamora

La Figura 54 representan la cantidad de lluvia al año superiores a 20mm para la ciudad de Quito. En las estaciones Iñaquito a) e Izobamba b), tienen un valor significativo

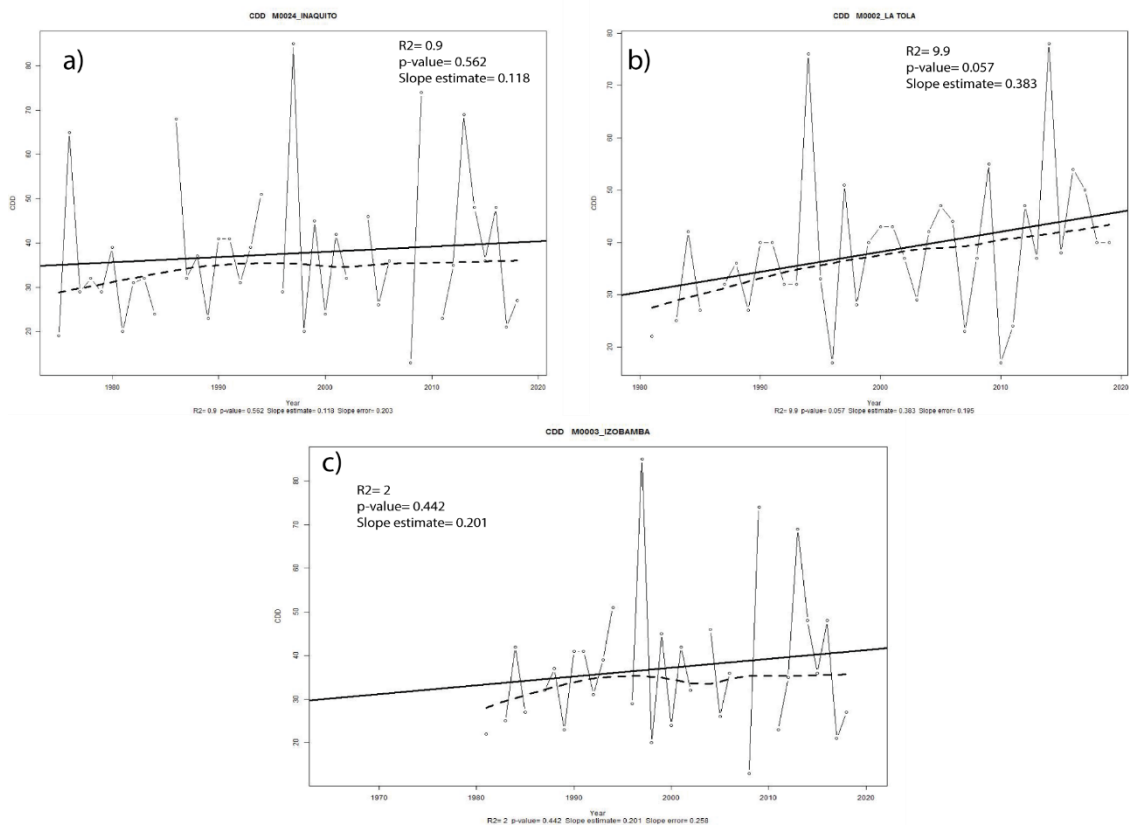
con un p-value de 0.084 y 0.213 respectivamente, lo cual muestra que estas dos estaciones cuentan con comportamientos similares a pesar de estar ubicadas en lugares distintos, esta similitud se ve marcada por una pendiente de 0.088 mm en las dos estaciones. Así como también valores máximos de 23 días y mínimos de 7 días.

Mientras que, en La Tola c), la significancia estadística es de 67.10 %, y muestra un aumento de 0.044 mm en cuanto al número de días con precipitaciones intensas que sobrepasan los 20 mm. Siendo sus valores más altos de 18 días y mínimos de 6 días.

5.3.3.6 Días Secos Consecutivos (CDD).

Figura 54.

Resultado gráfico de días secos consecutivos de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen muestra los días secos consecutivos. Elaborado por: Santillán K., Zamora

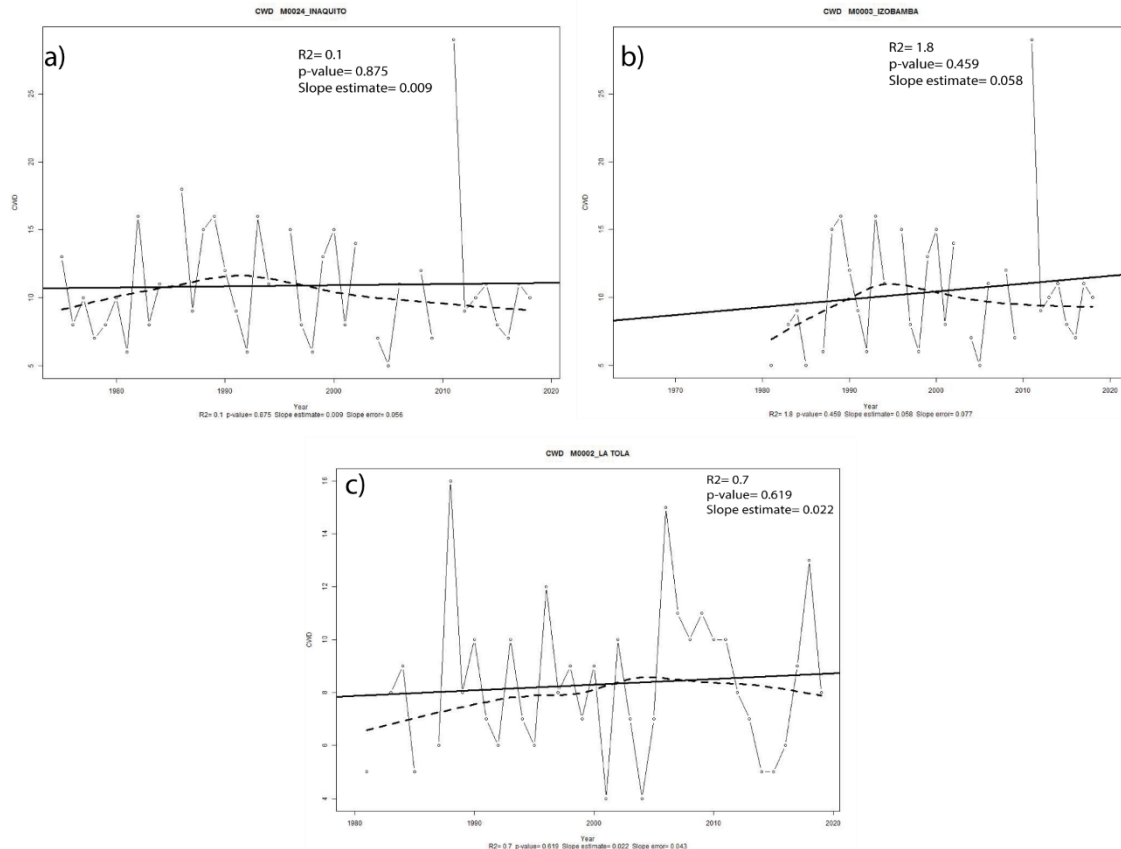
La Figura 55 representa la cantidad de días secos en la ciudad de Quito. En las estaciones Iñaquito a) e Izobamba b), tienen un valor significativo con un p-value de 0.562 y 0.442 respectivamente, con un comportamiento similar del número de días secos consecutivos, que van desde 13 a 69 días y de 13 a 74 días en cada estación. Así como también un incremento de 0.118 días en Iñaquito y 0.383 en Izobamba. Cuyos máximos están en los años 2013 y 2009.

Mientras que la estación La Tola c), esta posee un p-value de 0.057; lo que significa que la existe mayor cantidad de días secos en los últimos años, y que ha ido variando con 0.201 días secos consecutivos, en los cuales las precipitaciones han sido menores a 1mm. Y estos valores van desde 17 a 78 días, con el máximo en el 2014.

5.3.3.7 Días Lluviosos Consecutivos (CWD).

Figura 55.

Resultado gráfico de días lluviosos consecutivos de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen indica la cantidad de días secos consecutivos. Elaborado por: Santillán K., Zamora

La Figura 56 muestra la cantidad de días lluviosos en la ciudad de Quito. En Iñaquito a), se obtuvo un p-value de 0.875 y un incremento de 0.009 días. En dicha estación se puede observar que existe un promedio de 10 días húmedos consecutivos, con un pico alto de 29 días en el 2011 y uno bajo de 5 días en el 2005.

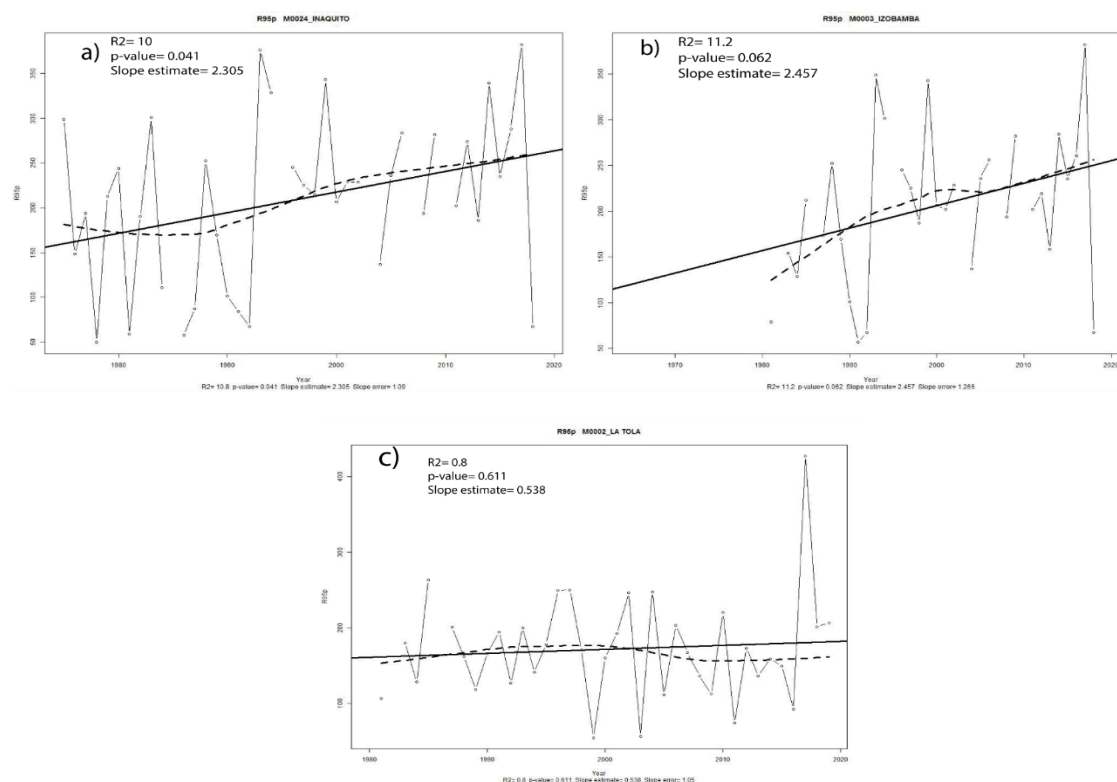
Para Izobamba b), la confiabilidad estadística es de 54.10% y presenta un aumento de 0.058 días a lo largo de 45 años. De igual manera existe un aumento de 29 días húmedos consecutivos en el año 2011 y un promedio de aproximadamente 11 días con 54 años de datos. Los valores mínimos oscilan entre 5 y 7 días.

Finalmente, para La Tola c), se puede observar que el gráfico posee más picos, tanto altos como bajos. En 1988 con 16 días, en los años 2001 y 2004 de 4 días, en el 2006 de 15 días y en el 2018 con 13 días húmedos consecutivos. La confiabilidad estadística está marcada por el 38.1% y un aumento en la pendiente de 0.022 días para 40 años.

5.3.3.8 Días Muy Lluviosos (R95p).

Figura 56.

Resultado gráfico de días muy húmedos que sobrepasan el percentil 95 de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen muestra la cantidad de días con mayor humedad. Elaborado por: Santillán K., Zamora

La Figura 57 muestra la cantidad de días muy húmedos que superan el 95% en la ciudad de Quito. En las estaciones Iñaquito a) e Izobamba b) tienen un valor significativo con un p-value de 0.041 y 0.062 respectivamente. Para Iñaquito el incremento está dado por una pendiente positiva de 2.305 días, con una variación de 58.1 a 382 mm en 1986 y

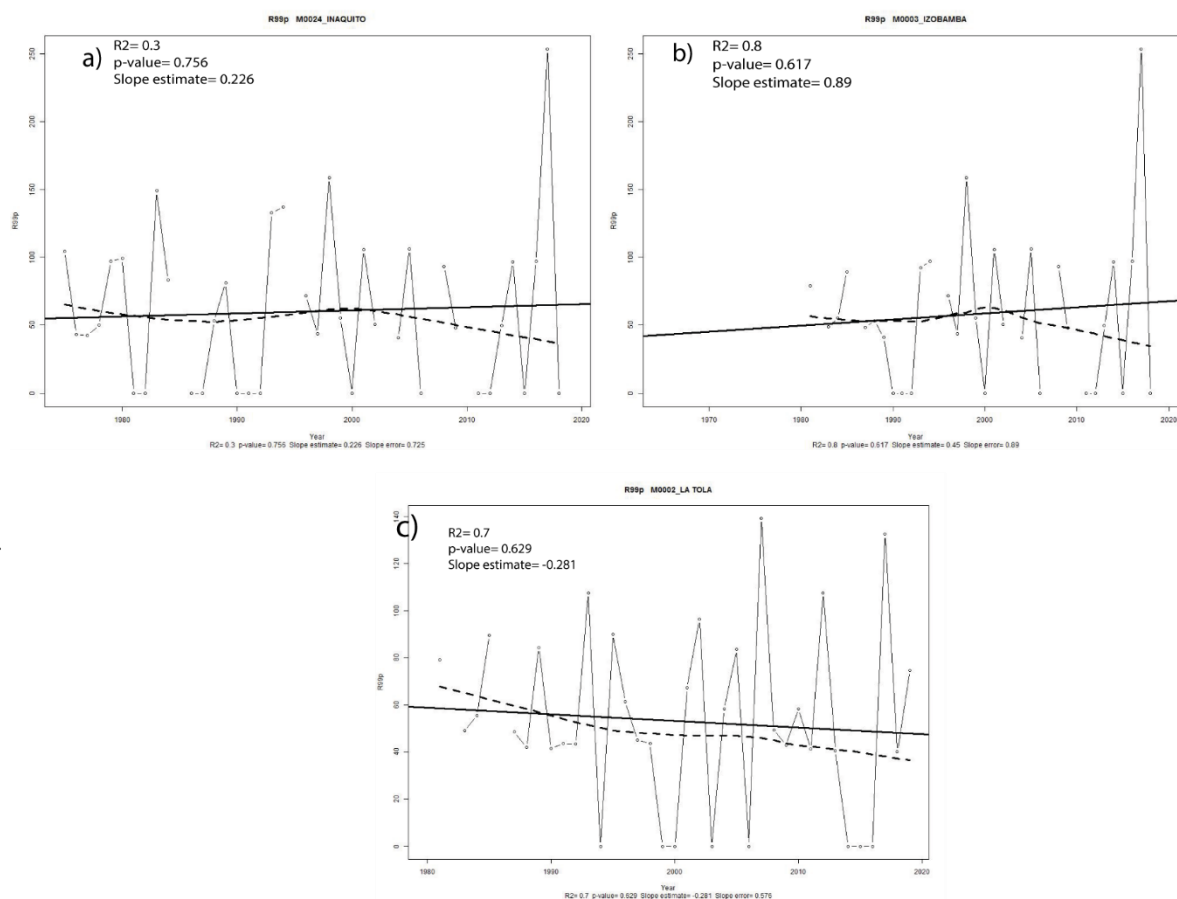
2017 respectivamente, mientras que para Izobamba, este aumento es de 2.457 días. Y su variación va desde los 57.1 en 1991 mm hasta los 382.1 mm en 2017.

Finalmente, para La Tola c), el p-value es de 0.611 y la pendiente que indica un incremento de 0.538 mm de días muy lluviosos en los últimos años. Siendo el mínimo de 54.8 mm en 1999 y el máximo de 263.6 en 1985. Sin embargo, en el año 2017 se muestra un aumento significativo de aproximadamente 427.4 mm.

5.3.3.9 Días Extremadamente Lluviosos (R99p).

Figura 57.

Resultado gráfico de días extremadamente lluviosos sobrepasan el percentil 99 de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen indica el porcentaje de días extremadamente lluviosos. Elaborado por: Santillán K., Zamora

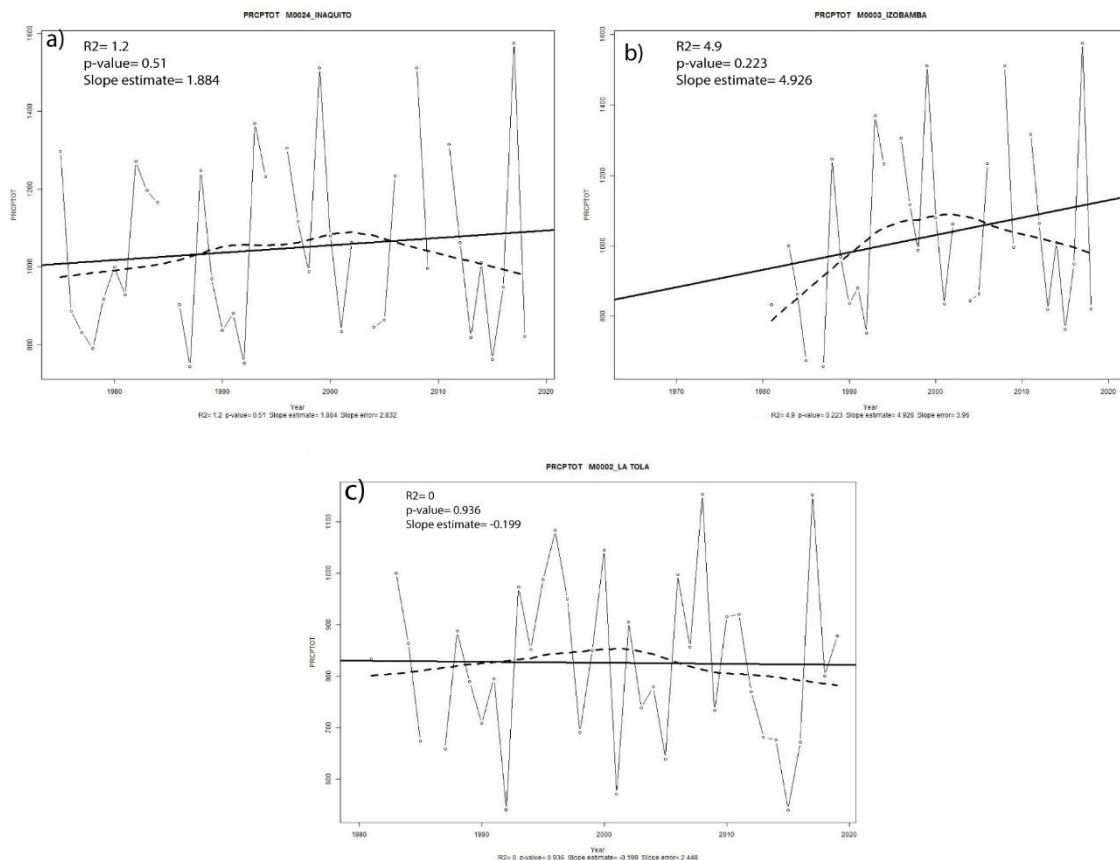
La Figura 58 muestra la estación Iñaquito a), la cual cuenta con un p-value de 0.756, y un aumento de 0.226 días extremadamente secos. Con un pico de 253.3 mm en el año 2017 y un mínimo de 50.2mm en 1978, al igual que la estación de Izobamba b), en la cual varía el p-value de 0.617 y la pendiente que indica el incremento de 0.45 mm. Con el mismo punto máximo de a) y un mínimo de 40.8mm en 2004.

Finalmente, en la estación de la Tola c), existe un p-value 0.629 y una pendiente negativa que demuestra una disminución de 0.281 días. Con picos máximos de 139.2 y 132.5 mm en los años 2007 y 2017 respectivamente en los que los días extremadamente secos sobrepasan el percentil 99.

5.3.3.10 Precipitación Total Anual (PRCPTOT).

Figura 58.

Resultado gráfico de precipitación total anual de las estaciones del INAMHI a) Iñaquito, b) Izobamba y c) La Tola



Nota: La imagen indica la cantidad de precipitación total al año. Elaborado por: Santillán K., Zamora

La Figura 59 muestra la cantidad de lluvia total en el año para la ciudad de Quito. Las tres estaciones tienen diferentes valores de p-value, los cuales son: 0,51, 0,223 y 0,936 respectivamente, lo que demuestra que la estación de Ñaquito a), presenta mayor cantidad de lluvias anuales, así como también una variación que va desde los 928 hasta 1574.8 mm durante un periodo de 45 años y en los cuales se puede observar un promedio de 1300 mm con pendiente de 1.884mm. Para Izobamba b), el promedio es de aproximadamente 821.3 a 1574.8 mm y su incremento se ve marcado por 4.926 mm de lluvias por año.

Finalmente, para La Tola c), su p-value es de 0.936 y tiene una disminución de 0.199 mm de lluvias al año. Su promedio es de aproximadamente 900 mm y tiene una variación en 40 años de 708 a 1151.4 mm de precipitaciones totales al año.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Climatología

Se realizó el control de calidad a los datos históricos obtenidos del Distrito Metropolitano de Quito, obtenidos de tres estaciones INAMHI y cuatro estaciones de la REMMAQ, de esta manera se obtuvo mediante el análisis del ciclo diurno de precipitación que ,alrededor de las 2am y 4pm, existen picos que concuerdan con los valores mínimos de presión atmosférica generando zonas de baja presión e inestabilidad, las horas en las que se produce la mayor precipitación corresponde a las 4pm, que también coincide con el mínimo de presión. Esta relación presión-precipitación, también se visualiza a nivel de precipitación estacional que es cuando se dan ligeros máximos de presión, en cambio en los meses de verano se genera estabilidad atmosférica y disminución de la lluvia.

En lo que se refiere a la temperatura, el principal forzante, como es de esperarse, es la radiación solar. Logrando las temperaturas máximas y temperaturas mínimas en las horas de las 13h00 y 6h00 respectivamente en todas las estaciones investigadas. A nivel estacional, las temperaturas máximas se dan en los meses de julio, agosto, septiembre, siendo el último el mes con mayores temperaturas máximas. Asimismo, es en esta época de verano durante el horario nocturno se tienen las más bajas temperaturas mínimas. Se presenta entonces que los meses más secos de verano producen menos inercia térmica y, por lo tanto, más sensibilidad a los cambios de temperatura y variabilidad. A nivel interanual, se nota un incremento sostenido de temperatura máxima en la estación de Tumbaco, mientras que en lo que respecta a las temperaturas mínimas en todas las estaciones urbanas se presenta un incremento marcado, que no es tan visible en las estaciones rurales de Izobamba y La Tola se hace evidente la importancia del EICU.

En la ciudad de Quito se evidencia que, en cuanto a la humedad relativa, su relación con la temperatura y la radiación es inversa. En el análisis se obtiene su mínimo a las 13h00 y el máximo se mantiene de 00h00 am a 05h00. A nivel estacional es evidente la presencia del verano en los meses de julio, agosto y septiembre en donde se registran los menores valores de humedad relativa.

Para la velocidad y dirección del viento, se determina que gracias a los vientos alisios y a la topografía. En la noche se presentan flujos de calor sensible, esto se debe a que los vientos son débiles y el aire frío cerca de la superficie es más denso que el aire tibio de más arriba. Activándose los vientos desde las 8am y logrando su máximo a las 3pm, es en este horario que la dirección cubre en su totalidad los 360°.

Cambio Climático

Según los resultados obtenidos en las Tablas (16, 17 Y 18), se considera como evidencia de Cambio Climático aquellos índices que presenten significancia estadística alta (sobre el 90% *, sobre el 99%** y mayor ***). Se encontró que, mientras más céntrica es la estación, más evidencia de los efectos de CC se encuentra: en Iñaquito existen 15 de 23 índices que confirman la presencia de CC. Mientras que en Izobamba se presenta 12 de 23. Sin embargo, en la estación rural de La Tola, sólo 2 indicadores de 23 muestran presencia de CC climático.

A la luz de estos resultados, podemos inferir que presencia del EICU, exacerba los efectos del CC. Sin embargo, no quiere decir que, en las zonas rurales, no exista evidencia de CC. Es necesario indicar que, en el período de 2005 a 2009 en la Tola, se presentaron años inusualmente fríos y secos, lo cual impidió encontrar significancias estadísticas suficientemente robustas. Sin embargo, luego de esta temporada fría, se vio un incremento inclusive más acelerado al calentamiento de la zona, lo que en un futuro podría indicar efectos del cambio climático mucho más evidentes.

Al realizar el análisis de temperaturas mínimas TN, que, aunque ocurren alrededor de las 6am son un reflejo de las temperaturas nocturnas, se muestra que existe un calentamiento en las estaciones de Iñaquito e Izobamba a las que es evidente la suma de los efectos EICU + CC. En Iñaquito, el índice que indica el valor mínimo de la temperatura mínima diaria (TNn) ha aumentado a razón de $1.15^{\circ}\text{C}/10$ años con certeza del 100% ($p\text{-value}=0$); mientras que en Izobamba este índice cambia a razón $0.21^{\circ}\text{C}/10$ años con una certeza del 98,8% ($p\text{-value}=0,012^*$). Mientras que los índices que indican los cambios en los valores máximos de las temperaturas mínimas (TNx), han aumentado a razón de $0.38^{\circ}\text{C}/10$ años en Iñaquito y en Izobamba a razón de $0.21^{\circ}\text{C}/10$ años, ambos índices con una certeza del 100%. Lo cual puede ser corroborado con las proyecciones de los escenarios de temperatura mínima según (Armenta, 2016) en el cual, a nivel regional interandino, basado en 29 estaciones utilizadas, entre las cuales están 3 de ellas están la actual investigación, se presenta que para el periodo 2011-2040 existirá un aumento de entre 0.3 y 0.4°C . En conclusión, existe una disminución drástica de las bajas temperaturas y olas de frío en la capital.

En cuanto a temperaturas máximas, que ocurren alrededor de las 13h00, para el análisis del índice que indica el valor máximo de la temperatura máxima diaria (TXx) ha habido un incremento $0.6^{\circ}\text{C}/10$ años con una certeza del 100% para Iñaquito y en $0.18^{\circ}\text{C}/10$ años para Izobamba con una certeza del 99.2%. Lo que quiere decir que, dichas temperaturas son más altas y más frecuentes, aunque su ritmo de incremento no es tan alto como el caso de las temperaturas mínimas, de igual manera, el presente estudio concuerda con los análisis realizados por (Venegas, 2020), en el cual se indica que las temperaturas máximas son diferentes en cuanto a la localidad de las estaciones, para Izobamba, ubicada al sur del DMQ, posee temperaturas más bajas, mientras que Iñaquito se registran temperaturas sobre los 27°C .

Con los resultados de la precipitación, nuevamente se ve diferencia entre las estaciones urbanas Ñaquito, y las rurales de La Tola e Izobamba. En las estaciones urbanas se ve claramente un incremento tanto en frecuencia como en intensidad de eventos extremos. Sobre todo, del índice que nos indica la precipitación máxima en 5 días consecutivos (RX5day), en el cual la pendiente en Ñaquito aumenta a razón de 7.72mm/10años, con una certeza del 100% mientras que en Izobamba los valores son muy parecidos, teniendo un incremento de 7.29mm/10años y una certeza del 97.9%. Este índice también es significativo para La Tola el cual aumenta a razón de 3.17 mm/10años con una certeza del 64%, lo que quiere decir que, dentro de una semana lluviosa, es más posible que se dé un evento extremo en todas las localidades. En una comparación con el análisis climático de (Venegas,2020), se verifica que el indicador R20mm está aumentando, lo que quiere decir que los días en los que se registran eventos de lluvia extremos, es decir los eventos de lluvia sobre los 20 mm están incrementando, un incremento muy parecido de 0.84 días/10 años y 0.88 días/10 años en Ñaquito e Izobamba; con certezas del 91.6% y 78.7% respectivamente. Mientras que en la Tola este índice no es estadísticamente significativo, pero sí es significativo el de días secos consecutivos (CDD) ya que su pendiente es de 3.83días/10 años, tiene una significancia estadística del 94.3%. Estos resultados son congruentes con los efectos esperados del CC, en los que se habla de una polarización de la lluvia, es decir, por un lado, el aumento de los eventos extremos y por otro la presencia de sequías (IPCC, 2014).

6.2 Recomendaciones

Para un correcto análisis de serie de datos meteorológicos es recomendable la revisión y actualización de los mismos debido a la existencia de una cantidad de datos inválidos, así como también la homogeneización y control de calidad pertinentes en cada una de las estaciones con sus respectivas variables, de tal manera que no exista errores al momento de su procesamiento, con la finalidad que se pueda garantizar la confiabilidad de los valores y gráficas obtenidas.

Para la obtención de la base histórica de las estaciones meteorológicas, se recomienda realizar la solicitud correspondiente con exactitud en cuanto a los datos a ser requeridos, así como también una correcta descarga de los mismos por medio de páginas oficiales del Municipio de Quito.

Se recomienda extender el proceso de análisis climatológico y de cambio climático, de tal manera que pueda existir una continuidad en el procesamiento de datos y en la obtención de respuestas que nos permitan enfrentar los posibles efectos ante el Cambio Climático y generar medidas de adaptación que puedan ajustarse con el paso del tiempo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Ahrens, D. (2009). *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. Belmont: CengageLearning.
- Andrango, D. (2018). *Determinación de la variabilidad climática mediante la aplicación de índices de cambio climático en el centro norte de la región interandina en el Ecuador*. EPN. Quito.
- Armenta, G. E., y Villa, J. (2016). *Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático*, Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático para Ecuador.
- Arteaga, L., y Burbano, J. (2017). *Efectos del cambio climático: Una mirada al Campo*. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 80.
- Bolaños, A. (22 de Julio de 2020). IAMQ. (K. Santillán, y E. Zamora, Entrevistadores)
- Cando, L. E. (febrero de 2010). *Incidencias de la variabilidad climática en los caudales mínimos del Ecuador*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1538/1/CD-2721.pdf>
- CMNUCC. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Washington: FCCC/INFORMAL/84.
- Constitución del Ecuador. (2008). *Asamblea Nacional Constituyente*. Obtenido de http://www.asambleanacional.gov.ec/documentos/constitucion_de_bolsillo.pdf
- Eugenio Villacis Rivadeneira, N. V. (2017). Precipitaciones extremas en la ciudad de Quito provincia de Pichincha. *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL VOL. XXXVIII*.
- Ferrero, R., y López, J. (28 de julio de 2018). *MÁXIMA FORMACIÓN. QUÉ ES R SOFTWARE*. Obtenido de <https://www.maximaformacion.es/blog-dat/que-es-r-software/>
- García, A. (2017, mayo 18). Nueva inundación en sector de la Plataforma tras lluvia en Quito. *El Comercio*. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/actualidad/inundaciones-plataforma-quito-lluvia-clima.html>.
- Gattinoni, N., Boca, T., Rebella, C., y Di Bella, C. (2011). Comparación entre observaciones meteorológicas obtenidas de estaciones convencionales automáticas a partir de la estimación de parámetros estadísticos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 75-85.
- Green, D. W., y Perry, R. H. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. Chicago: McGraw-Hill.
- Guamán, J. (2020). Índices de cambio climático y su afectación a la agricultura, caso de estudio catón Ambato. *Universidad Politécnica Salesiana*.
- IDEAM. (2001). *Manual Del observador meteorológico*. Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/013353/ManualOMeteorologico.pdf>
- IDEAM. (2018). *Metodología de la operación estadística variables meteorológicas*. Subdirección de Meteorología. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/Documento+metodologico+variables+meteorologicas.pdf/8a71a9b4-7dd7-4af4-b98e-9b1eda3b8744>
- INAMHI, I. N. (2013). *Introducción a la Meteorología y a la Climatología*. En J. González.

- INAMHI. (mayo de 2020). *Boletín climatológico mensual*. Obtenido de http://www.serviciometeorologico.gob.ec/meteorologia/boletines/bol_men.pdf
- IPCC. (2007). Cambio climático. En R. y. Pachauri, *Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza: Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A.
- IPCC. (2012). *Climate Change*. Valencia: Shythesis Report.
- Jiménez, E. D., y Cifuentes, J. I. (abril de 2018). *INSTRUMENTOS METEOROLÓGICOS Y PARÁMETROS DE MEDICIÓN*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/324544360_COMPENDIO_DE_ARTICULOS-_Instrumentacion_Ingenieria_Mecanica
- LaHora. (15 de mayo de 2017). *Diario La Hora*. Obtenido de <https://lahora.com.ec/noticia/1102058245/home>
- Ministerio de Ambiente del Ecuador. (2017). *Tercera Comunicación Nacional del Ecuador sobre Cambio Climático*. Quito.
- Mogrovejo, P. (2017). Bosques y cambio climático en Ecuador: el regente forestal. *Área de Estudios Sociales y Globales UASB*, 3.
- Muñoz, A. (2013). Análisis Estadístico Con Climdex De Índice Climáticos para las Provincias de Pichincha y Napo. Recuperado el 15 de abril de 2017: http://www.ambiente.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2014/07/Informe_Final_ClimDex_2013.pdf
- Muller, A. (2010). *Instrumentos meteorológicos*. Obtenido de <http://www.rfuess-mueller.de/131-0S.pdf>
- Perico-Agudelo, D. (2009). El espacio público de la ciudad: Una aproximación desde el estudio de sus características microclimáticas. *Cuadernos de Vivienda Y Urbanismo*, 2, 278–301.
- Portela, A., Rodríguez L., Jimenez, R. y Capa, B. (2004). *METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA*. Obtenido de <https://cab.inta-csic.es/uploads/culturacientifica/adjuntos/20130121115236.pdf>
- Poveda, G. (2004). *La Hidroclimatología de Colombia*. Colombia: Ciencias de la Tierra
- REMAAQ|. (15 de 08 de 2020). *Secretaria del ambiente*. Obtenido de <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/politicas-y-planeacion-ambiental/red-de-monitoreo#:~:text=La%20Red%20Metropolitana%20de%20Monitoreo,y%20servicios%20para%20la%20Red>
- República, U. d. (15 de septiembre de 2008). *Departamento de Ciencias de la Atmósfera*. Obtenido de <http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/climatologia/Practico2017/NotasObservaciones.pdf>
- Romps, D. M. (2016). Clausius-clapeyron scaling of CAPE from analytical solutions to RCE. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73(9), 3719–3737. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0327.1>
- Sandoval, C. (23 de noviembre de 2018). *El Comercio*. Obtenido de Carla Sandoval
- Serrano, S., Zuleta, D., Moscoso, V., Jácome, P., Palacios, E., y Villacís, M. (2012). Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y

- cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito. *La Granja, Revista Ciencias de la Vida*, 16.
- Serrano-Vincenti, S., Condom, T., Campozano, L., Guamán, J., y Villacís, M. (2020). An Empirical Model for Rainfall Maximums Conditioned to Tropospheric Water Vapor Over the Eastern Pacific Ocean. *Frontiers in Earth Science*, 8, 198. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00198>
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M. M. B., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., y Midgley, P. M. (2013). Cambio climático 2013 Bases físicas Resumen para responsables de políticas Resumen técnico. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf
- Teta, P., Formoso, A., y Tammone, M. (2005). Micromamíferos, cambio climático e impacto antrópico: ¿Cuánto han cambiado las comunidades del sur de América del Sur en los últimos 500 años? *Therya*, 5(1), 7–38. <https://doi.org/10.12933/therya-14-183>
- Trenberth, K., Aigu, D., Ro, R., y David, P. (2003). The changing character of precipitation. *American Meteorological Society*, 1205-1217.
- Troncoso Salgado, A. Y., y Barros López, J. G. (febrero de 2010). *ATLAS CLIMATOLÓGICO DEL ECUADOR*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1720/1/CD-2755.pdf>
- Tufiño, R. (octubre de 2019). *Conversor de Datos Meteorológicos*. Obtenido de <https://github.com/rtufino/Conversor-Datos-Meteorologicos>
- Valladares, L., y Verdezoto, A. (2014). *Diseño de la red de servicios de voz, datos y video*. Quito: EPN.
- Valverde, T., y Cano-Santana, Z. (2005). *Ecología y medio ambiente*. México: Pearson Education.
- Velastegui, N. A. (2012). *La lluvia y su relación con la purificación del aire en el sector noroeste de la ciudad de Quito*. Obtenido de http://192.188.51.77/bitstream/123456789/2859/1/52674_1.pdf
- Venegas, J. (2020). *Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios en el periodo 2006-2018 para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito*. <http://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/7482/1/T3268-MCCNA-Venegas-Analisis.pdf>
- Viñas, J. M. (2020). Presión y Temperatura. *Meteo*, 28(Alianza Editorial), 40,41.
- Zuñiga I., y Crespo, E. (2010). *Meteorología y Climatología*. Madrid: UNED.

8. ANEXOS

Definición De Índices

1. FDO

Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j . Cuente el número de días cuando:

$$Tn_{ij} < 0^{\circ}C$$

2. SU25

Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j . Cuente el número de días cuando:

$$Tx_{ij} > 25^{\circ}C$$

3. ID0

Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j . Cuente el número de días cuando:

$$Tx_{ij} < 0^{\circ}C$$

4. TR20

Sea la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j . Cuente el número de días cuando:

$$Tn_{ij} > 20^{\circ}C$$

5. GSL

Sea T_{ij} la temperatura media en el día i en el periodo j . Cuente el número de días entre la primera ocurrencia de por lo menos 6 días consecutivos con:

$$T_{ij} > 5^{\circ}C$$

Y la primera ocurrencia después de 1er Julio (1° Enero en HS) de por lo menos 6 días consecutivos con:

$$T_{ij} < 5^{\circ}C$$

6. TXx

Sea Tx_{kj} la temperatura máxima diaria en el mes k , periodo j . La máxima temperatura máxima diaria cada mes es entonces:

$$TXx_{kj} = \max (Tx_{kj})$$

7. TNx

Sea Tn_{kj} la temperatura máxima diaria en el mes^k , periodo j . La máxima temperatura mínima diaria cada mes es entonces:

$$TNx_{kj} = \max (Tn_{kj})$$

8. TXn

Sea Tx_{kj} la temperatura máxima diaria en el mes^k , periodo j . La mínima temperatura máxima diaria cada mes es entonces:

$$TXn_{kj} = \min (Tx_{kj})$$

9. TNn

Sea Tn_{kj} la temperatura mínima diaria en el mes^k , periodo j . La mínima temperatura mínima diaria cada mes es entonces:

$$TNn_{kj} = \min (Tn_{kj})$$

10. Tn10p

Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea $Tn_{in}10$ el día calendario del percentil 10th centrado en una ventana de 5-días. El porcentaje del tiempo es demasiado, donde:

$$Tn_{ij} < Tn_{in}10$$

11. Tx10p

Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea $Tx_{in}10$ el día calendario del percentil 10th centrado en una ventana de 5-días. El porcentaje del tiempo es demasiado, donde:

$$Tx_{ij} < Tx_{in}10$$

12. Tn90p

Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea $Tn_{in}90$ el día calendario del percentil 90th centrado en una venta de 5-días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$Tn_{ij} > Tn_{in}90$$

13. Tx90p

Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea $Tx_{in}90$ el día calendario del percentil 90th centrado en una venta de 5-días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$Tx_{ij} > Tx_{in}90$$

14. WSDI*

Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea Tx_{in90} el día calendario del percentil 90th centrado en una ventana de 5-días. Entonces el número de días

$$Tx_{ij} > Tx_{in90}$$

15. CSDI*

Sea Tn_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea Tn_{in10} el día calendario del percentil 90th centrado en una ventana de 5-días. Entonces el número de días

$$Tn_{ij} < Tn_{in10}$$

16. DTR

Sea Tx_{ij} y Tn_{ij} las temperaturas diarias máximas y mínimas respectivamente en el día i en el periodo j . Si l representa el número de días en j , entonces:

$$DTR_j = \frac{\sum_{i=l}^I (Tx_{ij} - Tn_{ij})}{I}$$

17. RX1day

Sea RR_{ij} el total diario de precipitación en el día i en el periodo j . Entonces los valores de 1-día para el periodo en el día i en el periodo j son:

$$Rx1day_i = (RR_{ij})$$

18. RX5day

Sea RR_{kj} la cantidad de Precipitación para el intervalo de cinco días terminado en k en el periodo j . Entonces los valores de 5-días para el periodo en el día i en el periodo j son:

$$Rx5day_i = (RR_{kj})$$

19. SDII

Sea RR_{wj} la cantidad diaria de Precipitación en días húmedos, $w(RR \geq 1mm)$ en el periodo j . Si W representa el número de días húmedos en j , entonces:

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=l}^W RR_{wj}}{W}$$

20. R10

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq 10 \text{ mm}$$

21. R20

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq 20 \text{ mm}$$

22. Rnn

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Si nn representa cualquier valor razonable de precipitación diaria entonces, cuente el número de días donde: $RR_{ij} \geq nnmm$

23. CDD*

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Si nn representa cualquier valor razonable de precipitación diaria entonces, cuente el número de días donde: $RR_{ij} < 1mm$

24. CWD*

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el más grande número de días consecutivos donde:

$$RR_{ij} \geq nnmm$$

25. R95Ptot

Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo $w(RR \geq 1.0mm)$ en el periodo j y sea $RR_{wn}95$ el percentil 95th de precipitación en los días húmedos en el periodo 1961-1990. Si w representa el número de días húmedos en el periodo, entonces:

$$R95p_j = \sum_{w=l}^w RR_{wj} \text{ where } RR_{wj} > RR_{wn}95$$

26. R99p

Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo $w(RR \geq 1.0mm)$ en el periodo j y sea $RR_{wn}99$ el percentil 99th de precipitación en los días húmedos en el periodo 1961-1990. Si w representa el número de días húmedos en el periodo, entonces:

$$R99p_j = \sum_{w=l}^w RR_{wj} \text{ where } RR_{wj} > RR_{wn}99$$

27. PRCPTOT

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en un día i en el periodo j . Si I representa el número de días en j , entonces:

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=l}^I RR_{ij}$$